

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ

INFORME

CÓDIGO DE PROYECTO 104901

Elaborado por:

GLOBAL YAKU CONSULTORES S.A.C.
Avenida 02 de Mayo 516. Oficina 201
Miraflores, Lima-Perú

Preparado para:

FIRST QUANTUM MINERALS LTD.
Torre de las Américas, Torre A, Piso 21
Punta Pacífica, Panamá City

Control de Revisiones

Participantes: Emilio Lacho (EL)/ Elizabeth Ordóñez (EO)/ Edwin Giraldo (EG)/ Diana Pajuelo (DP)/ Alfredo Huamaní (AH)

Revisión	Fecha	Responsable	Revisado por	Aprobado por	Comentarios
1	15/07/2021	EL/ EO	EG	AH	
2	26/10/2021	EL/EO	DP	AH	
3					

DISCLAIMER

La información contenida en este documento ha sido elaborada para los fines de la Actualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual de Mina Cobre Panamá.

Este documento es y seguirá siendo propiedad de GYC, y sólo podrá utilizarse para los fines para los que fue encargado y de acuerdo con los términos del compromiso entre Global Yaku Consultores S.A.C. (GYC) y FIRST QUANTUM MINERALS LTD. (FQML).

Está prohibido cualquier uso y reproducción de la información contenida en este documento ya que puede ser confidencial o reservada.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	OBJETIVOS.....	4
1.2	ALCANCE DEL TRABAJO	4
2	ÁREA DE ESTUDIO.....	5
3	REVISIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE	7
4	INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA.....	11
4.1	GEOLOGÍA REGIONAL.....	11
4.2	GEOLOGÍA LOCAL	13
4.3	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	15
4.4	ESTUDIO GEOFÍSICO.....	16
4.4.1	<i>Descripción de las Líneas Geofísicas</i>	<i>18</i>
5	INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS HISTÓRICAS.....	26
5.1	PIEZÓMETROS EN EL ENTORNO DEL PROYECTO	26
5.2	RESULTADOS DE PRUEBAS HIDRÁULICAS EN PERFORACIONES.....	27
5.3	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA POR LITOLOGÍA	33
5.4	MEDICIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA	36
6	CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	38
6.1	PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS.....	38
6.1.1	<i>ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE CAMPO.....</i>	<i>39</i>
6.2	PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS DE LABORATORIO.....	40
6.2.1	<i>RESULTADOS DE PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS</i>	<i>40</i>
6.2.2	<i>ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS.....</i>	<i>43</i>
7	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	46
7.1	MARCO GEOLÓGICO	46
7.2	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	46
7.2.1	<i>Unidad Hidrogeológica UH-01.....</i>	<i>46</i>
7.3	RECARGA.....	47
7.4	DESCARGA.....	47
7.5	DIRECCIÓN DEL FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA	48
7.6	CONDICIONES DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTAL.....	48
8	CONCLUSIONES	56
9	RECOMENDACIONES	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1	Resumen de pozos y perforaciones en el área de estudio.....	9
Tabla 4-1	Resumen de líneas geofísicas ejecutadas en el área de estudio.....	16
Tabla 5-1	Piezómetros en el entorno del proyecto	27
Tabla 5-2	Resumen de parámetros hidráulicos estimados en perforaciones.....	29
Tabla 5-3	Resumen de parámetros hidráulicos estimados en pozos de monitoreo	31
Tabla 5-4	Resumen de conductividades hidráulicas en litología saprock	33
Tabla 5-5	Resumen de conductividades hidráulicas en lecho rocoso	34
Tabla 5-6	Resumen de conductividades hidráulicas en litología aluvión/saprolito	34
Tabla 5-7	Resumen de conductividad hidráulica por litología	35

Tabla 6-1	Resumen de los parámetros fisicoquímicos de piezómetros	38
Tabla 6-2	Clasificación de los tipos de agua	43
Tabla 7-1	Clasificación de Unidades Hidrogeológicas.	47
Tabla 9-1	Coordenadas de piezómetros propuestos.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1	Ubicación del área de estudio	6
Figura 4-1	Geología regional.....	12
Figura 4-2	Geología local	14
Figura 4-3	Geología estructural del Tajo Botija	15
Figura 4-4	Líneas de estudio geofísico.....	17
Figura 4-5	Línea geofísica 09-MF-02	18
Figura 4-6	Línea geofísica 08-TMF-01	19
Figura 4-7	Línea geofísica 02-T17.....	20
Figura 4-8	Línea geofísica 06-T12.....	20
Figura 4-9	Línea geofísica 11-P20	21
Figura 4-10	Línea geofísica 04-P4A	22
Figura 4-11	Línea geofísica 05-P14	22
Figura 4-12	Línea geofísica 10-PA.....	23
Figura 4-13	Línea geofísica 03-P12	24
Figura 4-14	Línea geofísica 12-SBN	24
Figura 4-15	Línea geofísica 07-OA.....	25
Figura 4-16	Línea geofísica 01-GA.....	26
Figura 5-1	Clasificación de unidades hidrogeológicas en función de la conductividad hidráulica (m/s)	28
Figura 5-2	Conductividades hidráulicas vs profundidad por unidades litológicas	35
Figura 5-3	Hidrograma de niveles piezométricos en el área de estudio	37
Figura 6-1	Valores de pH en el área de estudio	39
Figura 6-2	Valores de conductividad eléctrica en el área de estudio.....	40
Figura 6-3	Valores de sulfatos (SO ₄) en el área de estudio	41
Figura 6-4	Valores de nitratos (NO ₃) en el área de estudio	41
Figura 6-5	Diagrama Schöller de muestras de agua	42
Figura 6-6	Diagrama Piper	45
Figura 7-1	Mapa hidrogeológico interpretado (agosto 2020).....	51
Figura 7-2	Sección hidrogeológica interpretada 1-1' (agosto 2020)	52
Figura 7-3	Sección hidrogeológica interpretada 2-2' (agosto 2020)	53
Figura 7-4	Sección hidrogeológica interpretada 3-3' (agosto 2020)	54
Figura 7-5	Sección hidrogeológica interpretada 4-4' (agosto 2020)	55
Figura 9-1	Piezómetros propuestos.....	60

Anexos

Anexo I - Tabla de Análisis Hidroquímico

1 INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde a la actualización del modelo hidrogeológico conceptual de Mina Cobre Panamá, que fue elaborado en base a la información proporcionada por Minera Panamá S.A. (MPSA), propiedad de First Quantum Minerals Ltd. (FQML).

1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente servicio ha sido actualizar y analizar el modelo hidrogeológico conceptual del área este y norte de la mina, en base a la información existente (geofísica y piezómetros), para determinar áreas sensibles y potenciales afectaciones a las aguas subterráneas en los alrededores de las poblaciones de San Benito, Nueva Esperanza y Nuevo Sinaí, y la parte norte de la relavera, cerca de la huella de Presa norte.

1.2 ALCANCE DEL TRABAJO

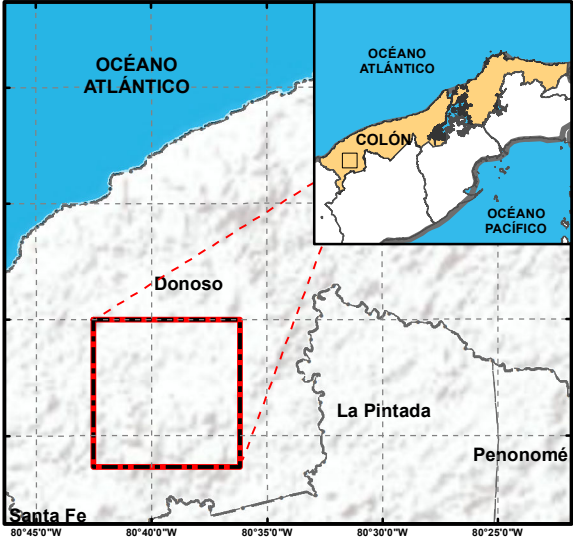
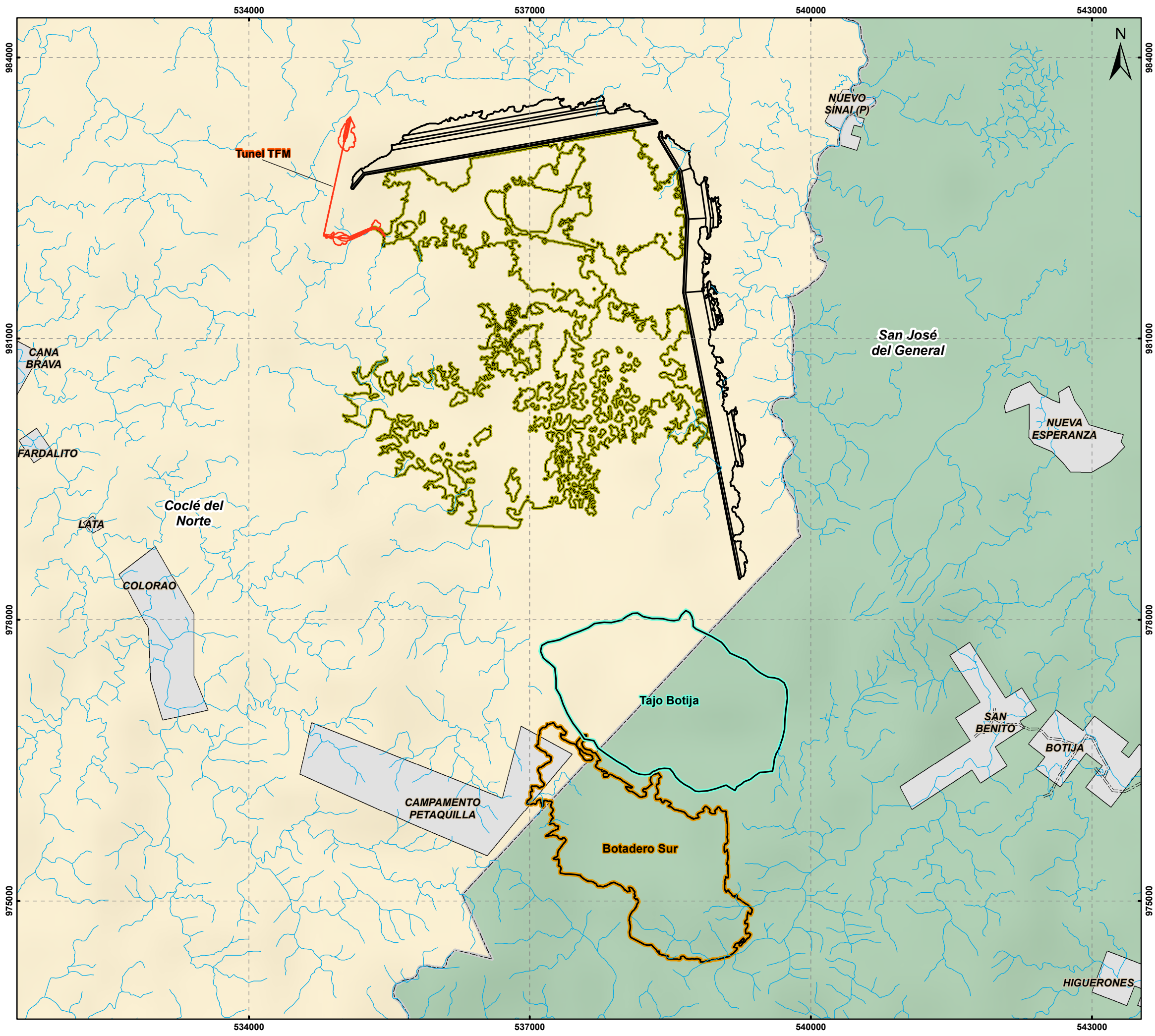
El alcance del servicio abarcó lo siguiente:

- Revisión de toda la información histórica existente, que incluyó estudios geológicos, hidrológicos, geofísicos, datos de perforación con pruebas hidráulicas, y modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Tajo Botija.
- Interpretación de las condiciones geológicas e hidrogeológicas, en base a la información de niveles piezométricos de 28 piezómetros (10 piezómetros simples, 6 piezómetros multinivel dobles y 2 piezómetros multinivel triples) ubicados en el área de estudio. Los piezómetros están ubicados respecto a la relavera: 07 al noroeste y 13 al este; respecto al Tajo Botija: 01 en el mismo Tajo Botija, 02 al este, 04 al sur y 01 al suroeste.
- Definición de las unidades hidrogeológicas en el área de estudio en base a los resultados de pruebas hidráulicas en piezómetros.
- Modelo hidrogeológico conceptual, con énfasis en la zona este, donde se ubican los centros poblados de San Benito, Nueva Esperanza y Nuevo Sinaí, y hacia el norte del depósito de relaves.

2 ÁREA DE ESTUDIO

La mina de Cobre Panamá se encuentra a 120 km al oeste de la ciudad de Panamá y a 20 km de la costa del Mar Caribe. Abarca un área de 130 km² y está ubicada en la zona nor-central de Panamá, provincia de Colón, distrito de Donoso.

El área del presente estudio abarca los sectores de Corregimiento de Coclé del Norte y San José del General. El Tajo Botija está ubicado en medio de los corregimientos y la zona de relave en Coclé del Norte, entre el túnel y Presa norte-este TMF (Figura 2-1).



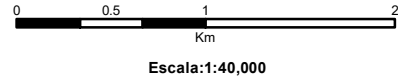
Provincia: Colón
Distrito: Donoso

Corregimiento de Coclé del Norte

Corregimiento de San José del General

SIMBOLOGÍA

- Ríos y quebradas
- Límite provincial
- Límite distrital
- Centros Poblados
- Huella de la Presa Norte y Este de TMF
- Área de estudio
- Huella del Tajo Botija
- Huella del Botadero Sur
- Huella de Relavera de TMF
- Huella de Tunel de TMF



Escala:1:40,000

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ

Ubicación del Area de Estudio

Global Yaku Consultores
GYC
Innovación para un Mundo Mejor

PROYECCION:	UTM	FIGURA N°: 2 -1
DATUM:	WGS 84	
ZONA:	17 N	

ELABORADO:	DIBUJADO: MC/E.O.	REVISADO: A.H.	FECHA: octubre, 2021
------------	-------------------	----------------	----------------------

FUENTE:
Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGNTG),
Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC)

ARCHIVO:
Figura 2-1_ Ubicación del Area de Estudio.mxd

3 REVISIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE

Se revisó la información histórica alcanzada por MPSA, en versión PDF y Excel, las que se asumieron como válidas y que podrían brindar un conocimiento de las condiciones geológicas e hidrogeológicas, principalmente del área de estudio.

A continuación, se lista la información revisada.

- Mapa de infraestructura (Golder, 2010).
- Mapa de ubicación.
- Mapa topográfico.
- Mapa de ubicación de las fuentes de origen de agua.
- Información, análisis, monitoreo, colección de información, resultados e inventario de evaporación, pluviometría y clima.
- Análisis, monitoreo, muestreo, resultados con balance hídrico de las variaciones de las escurrientías y flujos en las cuencas.
- Marco fisiográfico regional.
- Geología local y regional del área de estudio.
- Escenario regional y data histórica hidrogeológica de la mina.
- Marco de los lineamientos estructurales de la mina.
- Mapa de ubicación de los piezómetros y perforaciones de monitoreo.
- Unidades hidrogeológicas, geológicas, clasificación de rocas, monitoreo de pozos, niveles estáticos.
- Estimación del flujo base y recarga de agua subterránea.
- Registros litológicos de perforaciones.
- Datos de parámetros hidráulicos (transmisividad, conductividad hidráulica).
- Modelo hidrogeológico conceptual.
- Modelo hidrogeológico numérico.
- Archivo kml de ubicación de piezómetros a mayo del 2021.
- Registros históricos de niveles piezométricos actualizados desde 2019 a 2021.
- Datos hidroquímicos de las aguas subterráneas de piezómetros desde 2019 a 2021.
- Reporte interno del modelamiento de aguas subterráneas del año 2012.
- Unidades hidrogeológicas conceptuales en una sección W-E entre los Tajos Botija y Colina (imagen).
- Modelo 2D de las facilidades del manejo de la relavera (filtraciones, análisis de movimiento de partículas, transporte del contaminante).

- Reporte de Plan de Desarrollo de despresurización en el Tajo Botija.
- Reporte Borrador de la actualización y calibración del modelo numérico del Tajo Botija.
- Reporte del estudio geotécnico de la inclinación de las laderas para la propuesta del Tajo Botija.
- Investigación geotécnica (programa de registros, información del testigo (core), registros geológicos y geomecánicos, información de piezómetros, piezómetros de cuerda vibrante, información de presión de poro y mapeo de celdas).
- Información litológica y geomecánica de los siguientes pozos (Tabla 3-1):

• B11026-GT	• B11057-GT	• B11086-GT
• B11032-GT	• B11061-GT	• B11091-GT
• B11039-GT	• B11068-GT	• B11098-GT
• B11040-GT	• B11073-GT	• B11106-GT
• B11040A-GT	• B11077-GT	• B11112-GT
• B11046-GT		
- Planeamiento de la Mina (Tajo Botija).
- Pruebas hidráulicas de las perforaciones (Tabla 3-1):
 - B07055-HG (Monitoring and Slug Testing).
 - B07056-HG (Airlifting and Slug Testing).
 - BA07118-HG (Airlift Test, Slug Test, Slug Test Woz, Slug and Pump Test).
 - BA07119-HG (Slug Test, Slug with Drawal Test).
 - BN07116-HG (Slug Test).
 - BN07117-HG (Slug Testing and Air Lift Test).
 - CT07107 (Slug and Airlift test).
 - CT07121-HG (Slug Testing).
 - CT07122- HG (Slug Testing, Air Lift Testing).
 - CT07124 (Slug and Airlift Test, Well Development).
 - LA07100-HG (Slug Testing).
 - LA07101-HG (Air Lift Testing, Constant Rate Test, Slug Testing).
 - VG07096-HG (Slug Testing, Air Lift Testing).
 - VG07097-HG (Slug Testing and Recovery Overnight).
 - VG07105-HG (Slug Testing FH).
 - VG07106-HG (Air Lift Testing).
 - VG09024-HG (Slug Testing).

- Prospección Geoeléctrica continua para la evaluación de zonas potencialmente acuíferas (red de monitoreo), que incluye bosquejo geomorfológico y geológico, síntesis hidrológica, metodología y ejecución de la prospección geoeléctrica e interpretación de las líneas de prospección geoeléctrica continua, cerca de la zona norte del depósito de relaves y de las poblaciones ubicadas en la zona este.

Tabla 3-1 Resumen de pozos y perforaciones en el área de estudio

Pozo	Coordenadas UTM (WGS84)		Altitud (mbs)	Nivel de agua estático (mbs)	Nivel freático (msnm)	Profundidad total	Tipo
	Norte (m)	Este (m)					
B07055-HG	977198.52	537848.25	162	25.2	136.8	32.5	Perforaciones
B07056-HG	976106.50	539035.27	162	26.7	135.3	50.3	Perforaciones
BA07118-HG	976106.50	539035.27	140	19.52	120.5	26.2	Perforaciones
BA07119-HG	976107.50	539037.27	140	20.68	119.3	50	Perforaciones
BN07116-HG	978932.55	540433.29	164	15.9	148.1	21	Perforaciones
BN07117-HG	978925.55	540435.29	164	16.2	147.8	36	Perforaciones
CT07107-HG	983676.62	536323.23	36	1.96	34	49	Perforaciones
CT07121-HG	979605.56	536954.24	69	3.9	65.1	40	Perforaciones
CT07122-HG	979603.56	536952.24	69	3.31	65.7	17	Perforaciones
CT07124-HG	983677.62	536325.23	36	1.96	34	7	Perforaciones
LA07100-HG	980687.58	532425.17	114	15.9	98.1	29.2	Perforaciones
LA07101-HG	980690.58	532423.17	114	20.86	93.1	52.2	Perforaciones
VG07096-HG	975859.50	534197.20	163	5.15	157.9	26.5	Perforaciones
VG07097-HG	975859.50	534199.20	163	7.79	155.2	49.4	Perforaciones
VG07105-HG	975763.50	536782.00	303			23.17	Perforaciones
VG07106-HG	975765.00	536,782.00	303	26.41	276.6	50.9	Perforaciones
VG09024-HG	976026.00	535765.00	320			398	Perforaciones
B11026-GT	976818.00	539266.00	94.4		pozo	290.3	Pozo
B11032-GT	976778.80	539005.00	119.4			332.8	Pozo
B11039-GT	977334.40	538928.00	143.7			319.4	Pozo

Pozo	Coordenadas UTM (WGS84)		Altitud (mbs)	Nivel de agua estático (mbs)	Nivel freático (msnm)	Profundidad total	Tipo
	Norte (m)	Este (m)					
B11040A-GT	977282.00	537602.00	163.1			189	Pozo
B11040-GT	977287.00	537602.00	163.2			119.9	Pozo
B11046-GT	977008.20	538566.00	149.4			399.7	Pozo
B11057-GT	977343.00	537858.50	136.3			370	Pozo
B11061-GT	977106.00	538061.00	140			396	Pozo
B11068-GT	976875.00	537910.00	141.3			250	Pozo
B11073-GT	977690.00	538385.00	184.2			261.7	Pozo
B11077-GT	977535.80	538403.40	156			346	Pozo
B11086-GT	976643.00	538434.00	130			145	Pozo
B11091-GT	976573.00	539407.00	130			147.3	Pozo
B11098-GT	977431.00	539027.00	170			261	Pozo
B11106-GT	977746.00	537990.00	105			160.5	Pozo
B11112-GT	977434.00	537605.00	145			220.9	Pozo

Nota: mbs- metros bajo superficie; msnm- metros sobre el nivel del mar

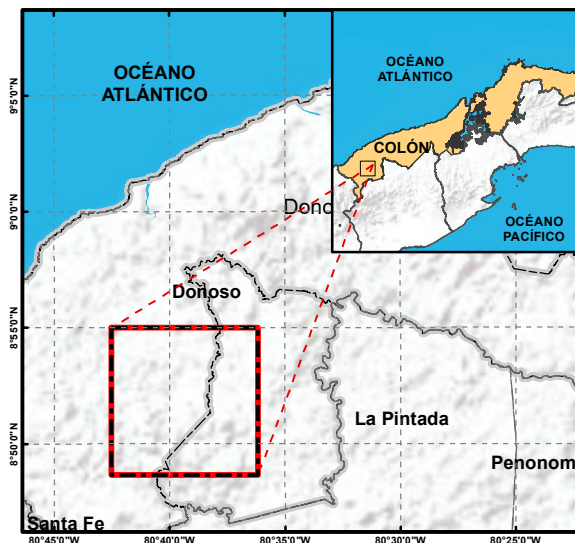
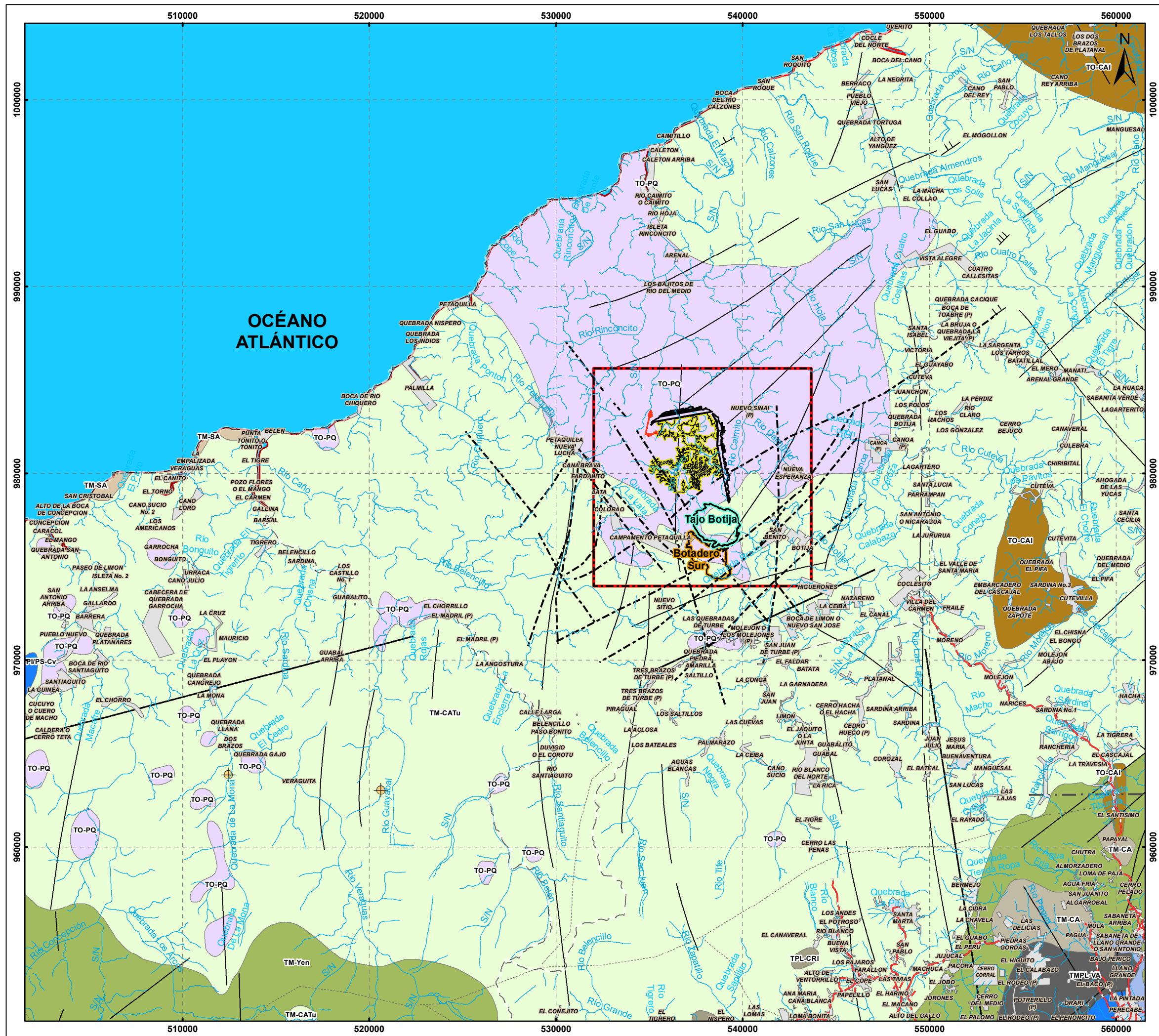
4 INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA

4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La geología regional en- y los alrededores de la mina Cobre Panamá presenta rocas en el rango de edad del Terciario a Cuaternario; y consisten en rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas. Las rocas volcánicas del Terciario varían de andesitas, basaltos a dacitas, riolitas intercalados con brechas y tobas (Grupos Cañazas y La Yeguada, Formación El Valle); y las de edad Cuaternaria consisten en basaltos y andesitas (Formación Cerro Viejo).

Las rocas sedimentarias, de edad Terciaria, consisten en secuencias detríticas tobáceas (Formaciones Caimito y Santiago) y las de edad Cuaternaria de intercalaciones de secuencias detríticas y tobas (Grupo Agua Dulce). Las secuencias anteriores son cortadas por rocas ígneas granodiorita (Formación San Cristóbal) y variedades de cuarzomonzonita, diorita y dacita (Formación Petaquilla) (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia, IGNTG).

La geología estructural indica que existen tres familias de fallas: la primera es una falla con orientación N-S, la segunda y tercera corresponden a fallas normales con orientación NE-SO y NO-SE, las cuales predominan dentro del área en estudio (Figura 4-1).



LEYENDA		
GRUPO	FORMACIÓN	SIMBOLOGIA
Grupo Aguadulce	Fm. Río Hato	QR-Aha
	Fm. Santiago	TM-SA
Grupo Caimito	Fm. Caimito	TO-CAI
	Fm. Cerro Viejo	PI/PS-Cv
Grupo La Yeguada	Fm. El Valle	TMPL-VA
	Fm. C. El Encanto	TM-Yen
Grupo Cañazas	Fm. Tucué	TM-CATu
	Fm. Cañazas	TM-CA
	Fm. San Cristóbal	TPL-CRI
	Fm. Petaquilla	TO-PQ

Nota: Modificada del Atlas Ambiental de la República de Panamá (2010)

SIMBOLOGÍA	
	Carretera Asfaltada
	Lineamiento
	Ríos y quebradas
	Falla
	Fallas Normales
	Fallas Interpretadas
	Costa Alta (Rocosa y de Formaciones Detriticas)
	Costa Baja Arenosa (Cordones Litorales y Flechas)
	Neck o Pitón Volcánico
	Rumbos y Buzamientos
	Limite distrital
	Infraestructura
	Área de estudio
	Huella del tajo
	Huella del Botadero Sur
	Huella de relavera
	Huella de Tunnel de TMF

0 2.75 5.5 11
Km
Escala: 1:200,000



ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ

Geología Regional			
Global Yaku Consultores GYC Innovación para un Mundo Mejor	PROYECCION:	UTM	FIGURA N°: 4-1
	DATUM:	WGS 84	
	ZONA:	17 N	
ELABORADO:	DIBUJADO:	MC/E.O.	REVISADO:
FUENTE:	ARCHIVO:		
Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGNTG)			Figura 4-1_Geología Regional.mpk

4.2 GEOLOGÍA LOCAL

La geología local del área de estudio está conformada mayormente por roca intrusiva (granodiorita), seguida de andesita y pórfidos (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia, IGNTG), que a continuación se describen:

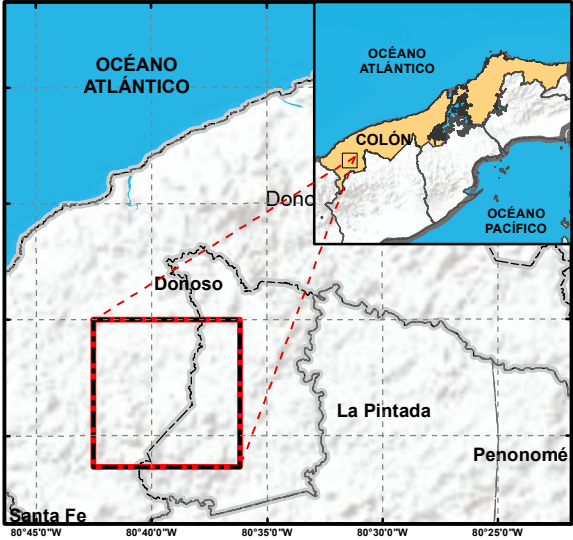
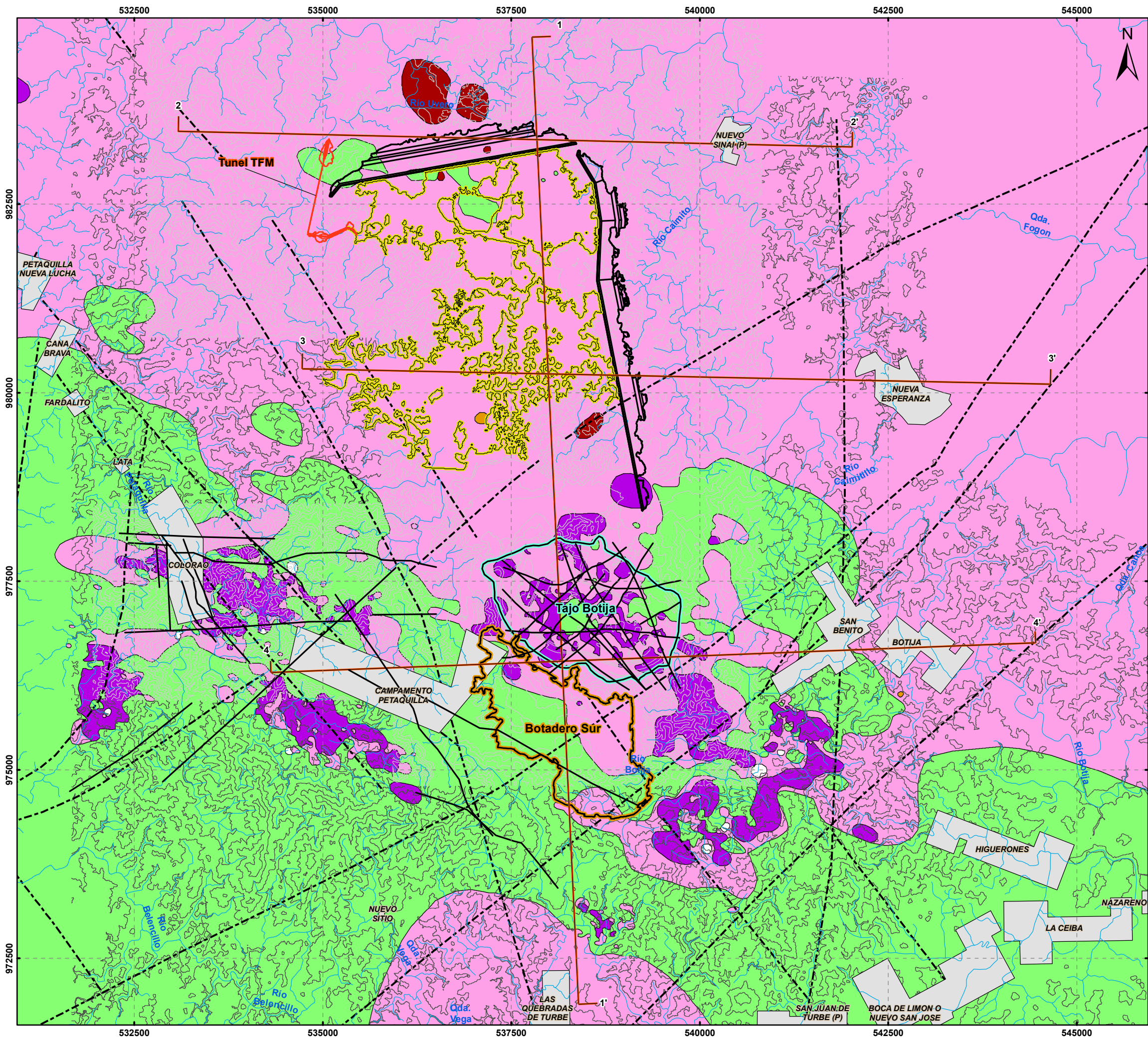
- **Formación Tucué (TM-CATu)**

Pertenece al Grupo Cañazas y está compuesta por lavas andesíticas-basálticas, brechas, tobas, cuerpos subintrusivos, conglomerados, volcanoclásticos y flujos de debris. Los conglomerados están compuestos por bloques de andesitas con poca matriz y sin estratificación, cortados por pórfidos. En el área de estudio afloran hacia el sur y sureste, en los alrededores de los centros poblados de Colorao, San Benito, Niguerones, La Ceiba y en el campamento Petaquilla; así como puntualmente afloran en la parte noroeste de la presa de relave.

- **Formación Petaquilla (TO-PQ)**

Consiste en rocas ígneas intrusivas de edad Oligoceno, específicamente como cuerpo granodiorítico equigranular de grano medio, cristales entrelazados de feldespato blanco, hornblenda y cuarzo. La granodiorita también contiene xenolitos máficos de grano fino a centimétricos, subredondeados a subangulares y diques de aplita ocasionales. En el área de estudio se encuentra ubicado en toda la extensión de la parte central, norte y este, en los alrededores del Tajo Botija y en los centros poblados Nuevo Sinaí, Nueva Esperanza, Botija y otros, así como de manera puntual aflora en la parte sur y suroeste del área de estudio (Figura 4-2).

Además, existen afloramientos de saprolitos ubicados al norte del Tajo Botija y cerca de la Presa norte, que corresponde a rocas con porciones de meteorización donde todavía es posible reconocer el relicto mineralógico. También han sido identificados saprock, de dimensiones pequeñas y ubicadas al sur del centro poblado Botija y en la relavera, consistente de materiales de roca en varios estados de meteorización (Figura 4-2).

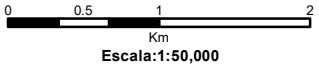


LEYENDA

- Saprolito
- Saprock
- Andesita - Fm. Tucué
- Granodiorita porfirítica - Fm. Petaquillas
- Granodiorita - Fm. Petaquillas

SIMBOLOGÍA

- Lineamiento
- Ríos y quebradas
- Curvas de nivel cada 20m
- Curvas de nivel cada 40m
- Línea de sección
- Límite provincial
- Límite distrital
- Centros Poblados
- Huella de la Presa Norte y Este de TFM
- Área de estudio
- Huella del Tajo Botija
- Huella del Botadero Sur
- Huella de Relavera de TFM
- Huella de Tunel de TFM



FIRST QUANTUM
MINERALS LTD.

**ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO
CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ**

Global Yaku Consultores GYC Innovación para un Mundo Mejor	Gelología Local		FIGURA N°: 4-2
	PROYECCION:	UTM	
	DATUM:	WGS 84	
ZONA:	17 N		

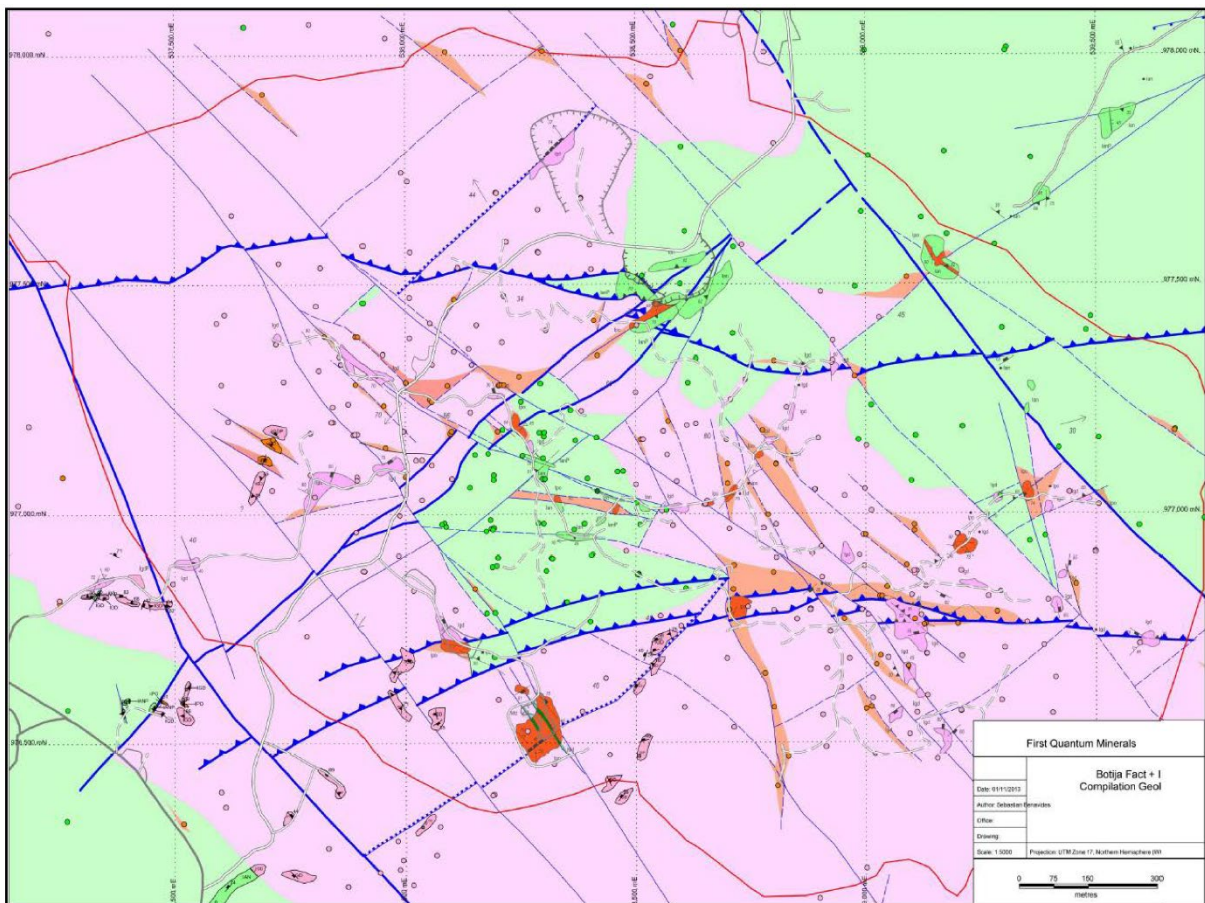
ELABORADO:	DIBUJADO: MC/E.O.	REVISADO: A.H.	FECHA: octubre, 2021
FUENTE: Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGNTG)		ARCHIVO: Figura 4-2_Gelología Local.mpk	

4.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La geología estructural dentro del Tajo Botija (Figura 4-3) consiste en tres generaciones de estructuras en el Proyecto Cobre Panamá (Model Earth, 2013).

Las primeras estructuras presentan una tendencia aproximada de este a oeste y noreste a suroeste, con fallas y cizallas asociadas. Las zonas de fallas son típicamente amplias (hasta 200 m) y anastomasadas, se cree que son parte de un sistema tectónico temprano. Existe un segundo conjunto de fallas de deslizamiento de rumbo conjugadas con dirección NE-SO, dominadas por una serie de fallas sinestrales. El tercer juego de fallas tiene una dirección NO-SE y presentan un movimiento tipo dextral con inclinaciones moderadas a pronunciadas tanto al norte como al sur. Todas estas fallas atraviesan muchas de las estructuras más antiguas en toda el área de la Mina Cobre Panamá (ver Figura 4-3)

Figura 4-3 Geología estructural del Tajo Botija



Fuente: Cobre Panamá Project Technical Report, Model Earth 2013

4.4 ESTUDIO GEOFÍSICO

Los estudios geofísicos que sirven como soporte en la caracterización del subsuelo, que consiste en determinar las posibles relaciones estratigráficas, estructuras geológicas (fallas, fracturas) existentes en cada una de las zonas estudiadas, así como espesores promedio de los diferentes tipos de rocas.

En el área de estudio se cuenta con información de estudios geofísicos que fueron ejecutados en diciembre del 2019 y noviembre del 2020 por Hydrogeocol Environment INC., versión 2, por encargo de Minera Panamá S.A.. En base al estudio geofísico, se tienen 12 líneas geofísicas realizadas con el método de tomografía eléctrica, que se consideran útiles para la interpretación hidrogeológica (Figura 4-4), y las cuales serán descritas de norte a sur.

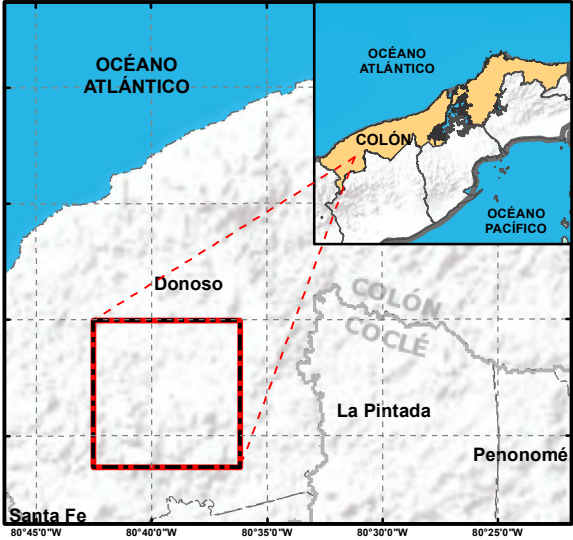
En la Tabla 4-1 se muestra el código asignado a cada línea eléctrica, coordenadas y longitud.

Tabla 4-1 Resumen de líneas geofísicas ejecutadas en el área de estudio

N°	Línea Geoelectrica	Ubicación	Coordenadas UTM (WGS84)		Longitud (m)
			Este (m)	Norte (m)	
1	09- TMF-02	Inicio	536419.11	983834.43	600
		Final	536981.85	984042.06	
2	08-TMF-01	Inicio	535036.9	982817.8	800
		Final	534339	983180	
3	02-T17	Inicio	539303.4	982199.28	800
		Final	539619.4	981467.38	
4	06-T12	Inicio	539949.1	980044.7	800
		Final	539496. 4	980705.3	
5	11-P20	Inicio	539499.99	979383.89	800
		Final	540297.16	979438.87	
6	04-P4A	Inicio	539508.01	977924.81	450
		Final	539080.68	978050.33	
7	05-P14	Inicio	539864.88	977106.82	800
		Final	540647.28	977040.43	
8	10-PA	Inicio	539477.89	977640.64	500
		Final	539978	977625.88	
9	03-P12	Inicio	540818.26	976312.55	589.037
		Final	540229.92	976283.9	
10	12-SBN	Inicio	541709.4	976709.67	800
		Final	541272.1	976068.8	
11	07-OA	Inicio	537254.58	975280	800
		Final	537812.22	975068.26	
12	01-G	Inicio	537934.63	974945.68	800
		Final	538162.59	974177.33	

Fuente:

Informe de Prospección Geoelectrica Continúa para la evaluación de zonas potencialmente acuíferas (Red de Monitoreo) en Minera Panamá S.A. (HYDROGEOCOL ENVIRONMENT INC., 2020)



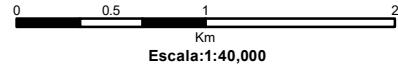
SIMBOLOGÍA

- Trocha carrozable
- Lineamiento
- Ríos y quebradas
- Límite distrital
- Centro Poblado
- Huella de la Presa Norte y Este de TMF
- Área de estudio
- Huella del Tajo Botija
- Huella del Botadero Sur
- Huella de Relavera de TMF
- Huella de Tunel de TMF

Estudios Geofísicos

- Línea Geoelectrica

HYDROGEOCOL ENVIRONMENT INC (2020)



FIRST QUANTUM
MINERALS LTD.

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ

Ubicación de Líneas Geofísicas

Global Yaku Consultores GYC Innovación para un Mundo Mejor	PROYECCION:	UTM	FIGURA N°: 4 -4
	DATUM:	WGS 84	
	ZONA:	17 N	

ELABORADO:	DIBUJADO: M.C.	REVISADO: A.H.	FECHA: octubre, 2021
------------	----------------	----------------	----------------------

FUENTE:	ARCHIVO:
Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGNTG), MINERA PANAMÁ S.A.	Figura 4-4_ Ubicación de Líneas Geofísicas.mpk

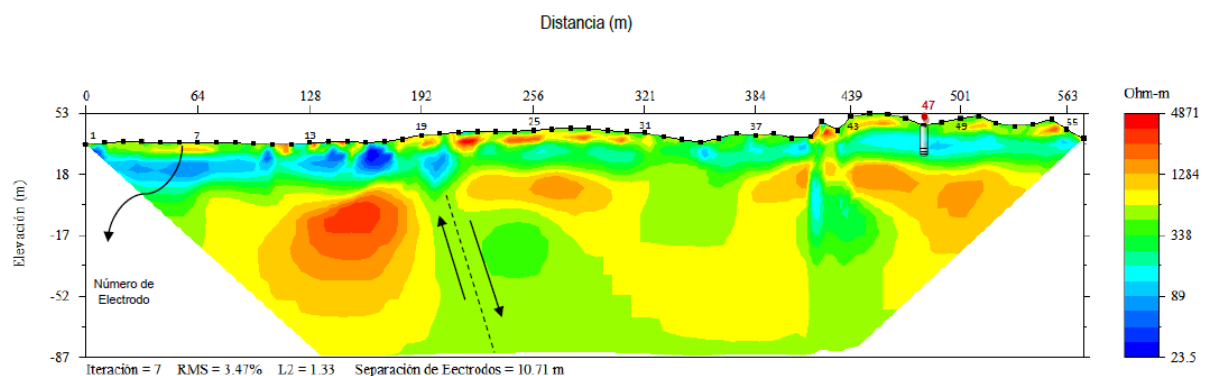
4.4.1 Descripción de las Líneas Geofísicas

Línea Geofísica 09-TMF-02

Se ubica en el extremo norte de la Presa norte. Tiene una longitud de 600 m en dirección N70°E desde su punto inicial, con coordenadas 983834.43 m N y 536419.11 m E y alcanza una profundidad de investigación de 98 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-5 donde se diferencian principalmente cinco (5) unidades, definidas por los valores de resistividad real. Se tiene la unidad más antigua, con valores de resistividad entre 1284 y 4871 Ohm-m, que representan rocas de composición granodiorítica o andesítica muy fracturada, desplazadas verticalmente por una falla normal con rumbo N20°E, la cual muy probablemente esté asociada al sistema de falla de Tajo Botija. Bordeando a estos cuerpos como una aureola se tiene la zona de transición de saprock (946.0 a 1182.5 Ohm-m) a saprolito (249 a 946 Ohm-m), con espesores que pueden llegar a 50 m. Sobreyacen los depósitos aluviales (paleocauces) con valores de resistividades entre los 23.5 y 249.0 Ohm-m, con espesores menores a 15 m. Cubriendo hasta la superficie están los depósitos coluviales representados por bloques de rocas conservados, distribuidos horizontalmente, identificados con valores de resistividades entre los 3587 y 4871 Ohm-m.

Figura 4-5 Línea geofísica 09-MF-02



Convenciones: ● Punto de Perforación Sugerido.

Fuente: Hydrogeocol Environment INC. (2020)

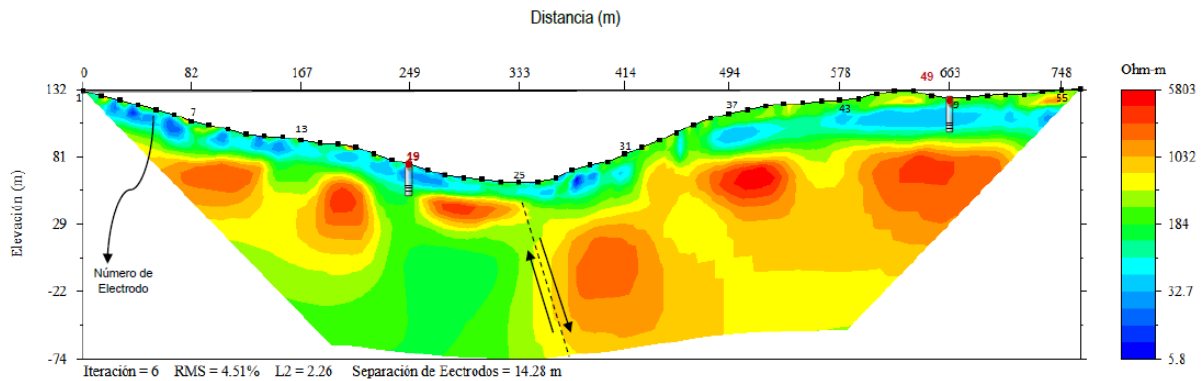
Línea Geofísica 08-TMF-01

Se ubica al noroeste de la Presa Norte, su punto inicial se ubica en cercanías a la vía que conduce al Decanting Pond de la mina. Tiene una longitud de m en dirección N60°W desde su punto inicial, con coordenadas 982817.8 m N y 535036.9 m E y alcanza una profundidad de investigación de 133 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-6 donde se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real. Se tiene la unidad más antigua, con valores de resistividad entre 1344 y 5803 Ohm-m, que representan rocas de composición granodiorítica o andesítica, ligeramente desplazadas por una falla normal con rumbo N50°W, la cual muy probablemente esté asociada al sistema de falla de Tajo Botija. Bordeando a estos cuerpos como una aureola se tiene la zona de transición de

saprock (486.7 a 772.4 Ohm-m) a saprolito (170.8 a 1143.0 Ohm-m), con espesores que pueden llegar a 100 m; cubiertos hasta la superficie se tiene a los depósitos aluviales (paleocauces) con valores de resistividades entre los 4.5 y 170.8 Ohm-m, con espesores no mayores a 10 m.

Figura 4-6 Línea geofísica 08-TMF-01



Convenciones: ● Punto de Perforación Sugerido.

Fuente: Hydrogeocol Environment INC (2020)

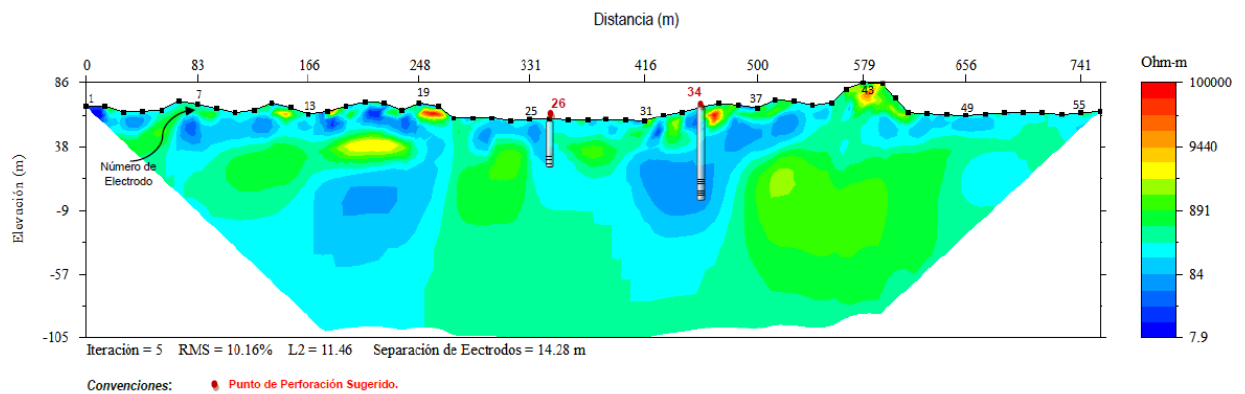
Línea Geofísica 02-T17

Se ubica cerca de la Torre 17, en la zona de la Presa este, tiene una longitud de 800 m en dirección N20°W desde su punto inicial, con coordenadas 982199.28 m N y 539303.4 m E y alcanza una profundidad de investigación de 133 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la **Figura 4-7** y muestra una correlación estratigráfica similar a la línea geofísica 01-G, donde se tiene el saprock en el nivel inferior, con valores de resistividad entre 5307 y 7556 Ohm-m y un espesor de 10 hasta 15 m que corresponde a la transición, por efectos de la meteorización de la granodiorita o diorita fresca a una roca con moderado grado de meteorización, cubierto por saprolito con valores de resistividad entre 736 y 9801 Ohm-m, con espesores entre 30 y 120 m. El saprolito al ser erosionado por antiguas corrientes superficiales, constituye la base de paleocauces, litológicamente constituidos por arenas finas a gruesas que envuelven a fragmentos de tamaño de cantos y grava fina a gruesa, con valores de resistividad entre 66.5 y 736.0 Ohm-m. Sobre la superficie del terreno se tiene promontorios aislados de los depósitos coluviales, litológicamente conformados por fragmentos de rocas de diferentes tamaños en matriz saprolítica, con valores de resistividad mayores a 9100.8 Ohm-m.

Estructuralmente, no se reflejan eventos tectónicos que modifiquen la secuencia estratigráfica descrita.

Figura 4-7 Línea geofísica 02-T17



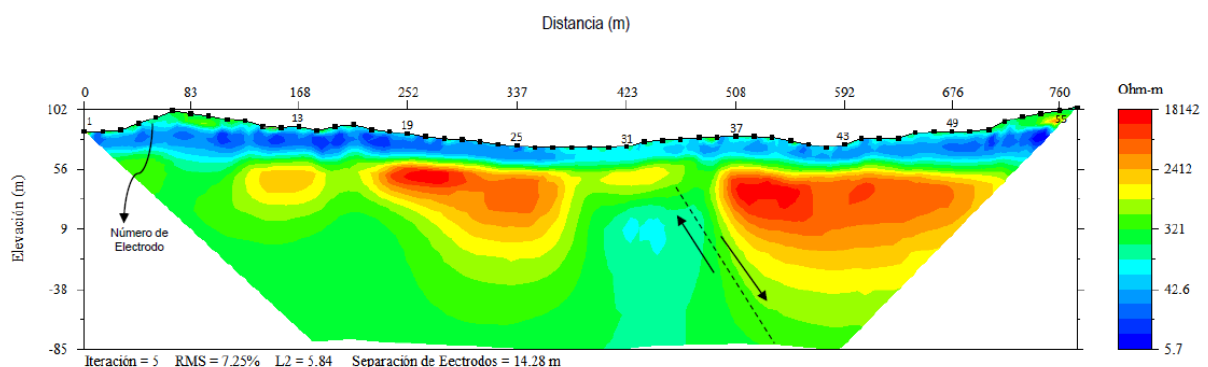
Fuente: Hydrogeocol Environment INC. (2020)

Línea Geofísica 06-T12

Se ubica en el borde Oriental de la vía que conduce a la Planta de Emulsión, al norte de la Torre 12 al este del depósito de la presa y relaves. Tiene una longitud de 800 m en dirección N30°W desde su punto inicial, con coordenadas 980044.7 m N y 539949.1 m E y alcanza una profundidad de investigación de 133 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-8 donde se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real. En su parte media (electrodos 19 a 25 y 37 a 49), se tiene la unidad más antigua, con valores de resistividad entre 2091 y 18142 Ohm-m que representan rocas de composición granodiorítica o andesítica fracturadas con un espesor mayor a 100 m, ligeramente desplazadas por una falla normal de rumbo N30°W; la cual muy posiblemente corresponde al sistema de fallas Tajo Botija. Bordeando a estos cuerpos como una aureola se tiene la zona de transición de saprock (2091 a 2412 Ohm-m) a saprolito (278.4 a 843.7 Ohm-m), con espesores que pueden llegar a 220 m, cubiertos hasta la superficie se tiene a los depósitos aluviales (paleocauces) con valores de resistividades hasta los 112.2 Ohm-m, con espesores de 20 a 40 m.

Figura 4-8 Línea geofísica 06-T12



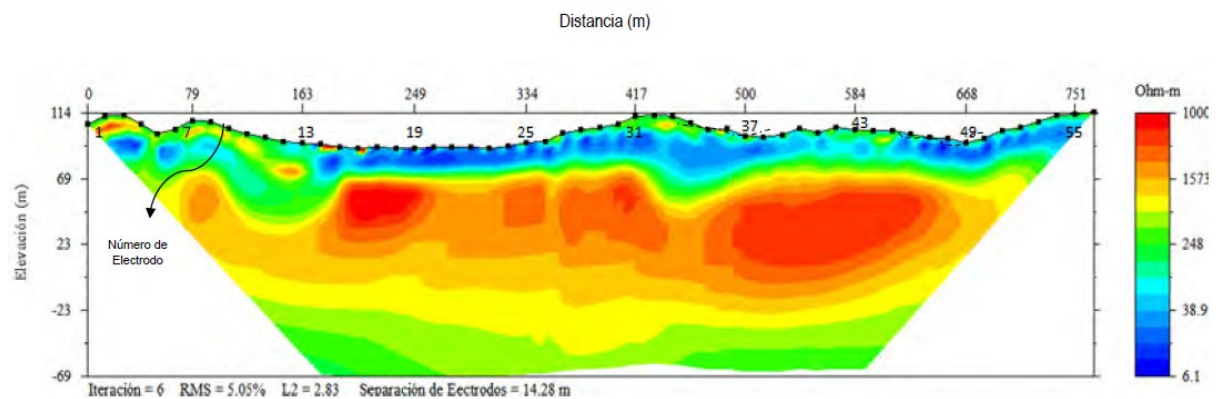
Fuente: Hydrogeocol Environment INC. (2020)

Línea Geofísica 11-P20

Se ubica cerca y al norte del Campamento Cobre, al noreste del Tajo Botija. Tiene una longitud de 800 m en dirección este-oeste desde su punto inicial con coordenadas 979383.89 m N y 539499.99 m E y alcanza una profundidad de investigación de 133.33 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-9 donde se diferencian principalmente cinco unidades, definidas por los valores de resistividad real. Se tiene la unidad más antigua, con valores de resistividad entre 1344 y 8965 Ohm-m, que representan rocas de composición granodiorítica o andesítica muy fracturada, desplazadas verticalmente por una falla de rumbo N20°W. Bordeando a estos cuerpos como una aureola se tiene la zona de transición de saprock (1143.0 a 1428.5 Ohm-m) a saprolito (170.8 a 1143.0 Ohm-m), con espesores que pueden llegar hasta 120 m. Sobreyacen los depósitos aluviales (paleocauces) con valores de resistividades entre 170.8 y 1143.0 Ohm-m, con espesores menores a 15 m. Cubriendo la superficie están los depósitos coluviales, representados por bloques de rocas, identificados con valores de resistividades entre los 1143.0 y 1428.7 Ohm-m.

Figura 4-9 Línea geofísica 11-P20



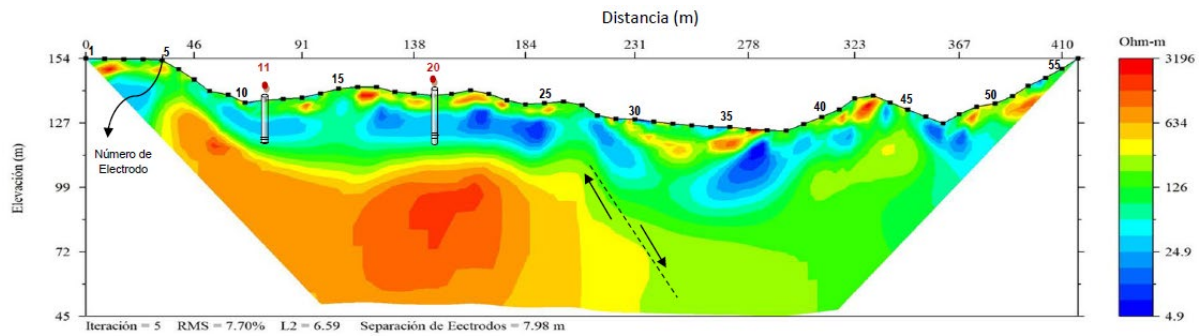
Fuente: Hydrogeocol Environment INC (2020)

Línea Geofísica 04-P4A

Se ubica en el sector nor-oriental del Tajo Botija, próxima a la estructura de almacenamiento de relave conocida como Poza 4A. Tiene una longitud de 450 m en dirección N65°W desde su punto inicial, con coordenadas 977924.81 m N y 539508.01m E y alcanza una profundidad de investigación de 75 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-10 donde se diferencian principalmente cinco (5) unidades, definidas por los valores de resistividad real. La unidad más antigua se observa en la parte inferior izquierda, representada por los mayores valores de resistividad (1270 - 3200 Ohm-m), interpretados según la geología del área pueden representar rocas de composición granodioríticas o andesíticas fracturadas, desplazadas aproximadamente 60 m por una falla normal con rumbo NW. Bordeando esta unidad como una aureola delgada se tiene la zona de transición de saprock (380 a 636 Ohm-m) a saprolito (125 a 150 Ohm-m), ambas unidades de espesores variables. Sobreyace un horizonte de depósitos aluviales (paleocauces) con valores de resistividad entre 5 y 75 Ohm-m. Cubre hasta la superficie depósitos coluviales de pequeña área y aislados con valores de resistividad entre 250 y 1918 Ohm-m.

Figura 4-10 Línea geofísica 04-P4A



Convenciones: ● Punto de Perforación Sugerido.

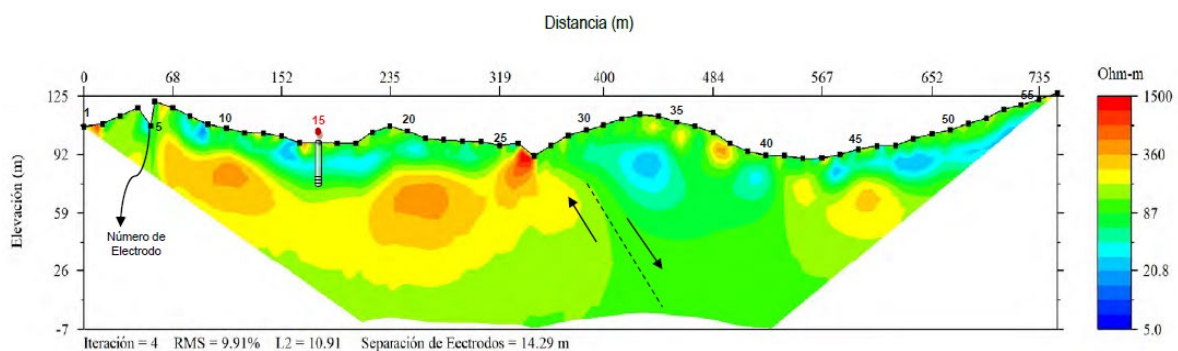
Fuente: Hydrogeocol Environment INC (2020)

Línea Geofísica 05-P14

Se ubica en el sector oriental central del Tajo Botija, entre las dos anteriores líneas 03-P-12 y 04-P4A. Tiene una longitud de 800 m en dirección N85°W desde su punto inicial, con coordenadas 977106.82 m N y 539864.88 m E y alcanza una profundidad de investigación de 133.33 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-11 donde se diferencian principalmente cinco (5) unidades, definidas por los valores de resistividad real. La unidad más antigua se observa en la parte inferior hacia ambos lados, representada por los mayores valores de resistividad (360 - 1500 Ohm-m), interpretados según la geología del área pueden representar rocas de composición granodioríticas o andesíticas fracturadas, desplazadas por una falla de rumbo NE. Rodeando estos cuerpos se tiene la zona de transición de saprock (223 a 360 Ohm-m) a saprolito (53.9 a 223.5 Ohm-m), en esta sección la zona de saprolito presenta un gran espesor hasta 220 m. Ambas unidades de espesores variables, cubiertos hasta la superficie se tiene un horizonte de depósitos aluviales (paleocauces) con resistividad entre 5 a 37.3 Ohm-m y sobreyacen aisladamente depósitos coluviales con valores de resistividades entre 223.5 a 291.7 Ohm-m.

Figura 4-11 Línea geofísica 05-P14



Convenciones: ● Punto de Perforación Sugerido.

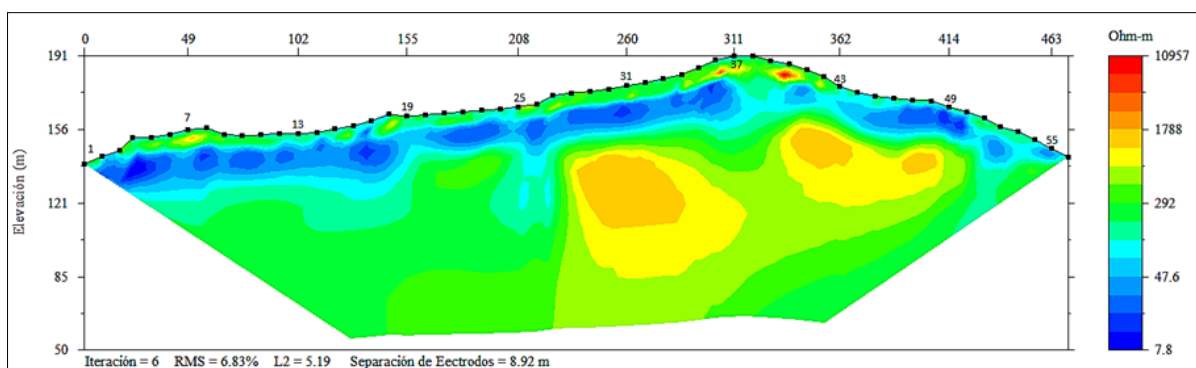
Fuente: Hydrogeocol Environment INC. (2020)

Línea Geofísica 10-PA

Se ubica próxima a la estructura de almacenamiento de relave conocida como Poza 4A, al este del Tajo Botija. Tiene una longitud de 500 m en dirección este desde su punto inicial con coordenadas 977640.64 m N y 539477.89 m E y alcanza una profundidad de 83 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-12 donde se muestra una correlación estratigráfica similar a las descritas anteriormente. Se tiene la unidad más antigua, con valores de resistividad entre 1029 y 2291 Ohm-m, que representan rocas de composición granodiorítica o andesítica muy fracturada. Bordeando a estos cuerpos como una aureola se tiene la zona de transición de saprock (1143.0 a 1428.5 Ohm-m) a saprolito (125 a 150 Ohm-m), con espesores que pueden llegar hasta los 90 m. Sobreyacen depósitos aluviales (paleocauces) con valores de resistividades entre los 7.4 y 54.1 Ohm-m, con espesores menores a 5 m. Cubriendo hasta la superficie están los depósitos coluviales por sectores aislados (electrodos 35 a 42) representados por bloques de rocas conservados, identificados con valores de resistividades entre los 2923 y 18553 Ohm-m. Estructuralmente, no se reflejan eventos tectónicos que modifiquen la secuencia estratigráfica descrita.

Figura 4-12 Línea geofísica 10-PA



Fuente: Hydrogeocol Environment INC. (2020)

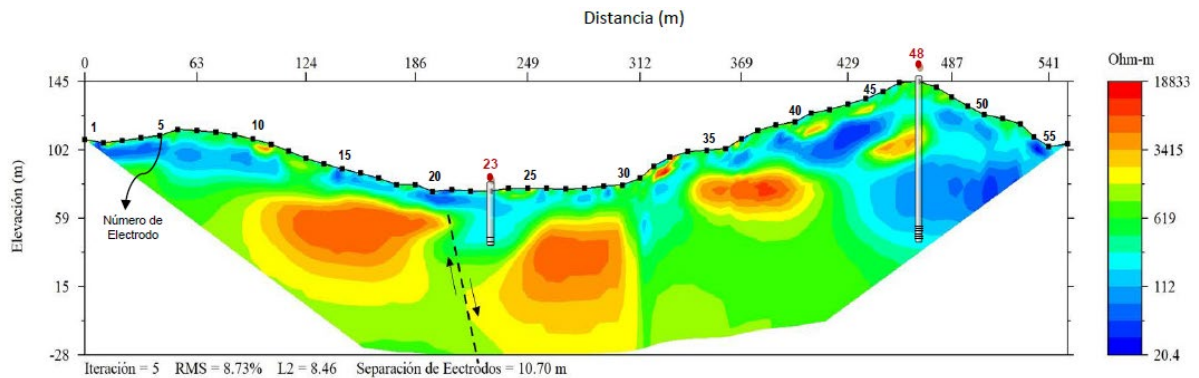
Línea Geofísica 03-P12

Se ubica cerca de una estructura de almacenamiento de relave conocida como Poza 12, al sureste del Tajo Botija. Tiene una longitud de 600 m en dirección N85°E desde su punto inicial, con coordenadas 976312.55 m N y 540818.26 m E y alcanza una profundidad de investigación de 100 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-13 donde se diferencian principalmente cinco unidades, definidas por los valores de resistividad real. La unidad más antigua se observa en la parte inferior izquierda, representada por los mayores valores de resistividad (3395 - 18800 Ohm-m) presentes en el subsuelo a lo largo de ella, estos valores pueden representar rocas de composición granodioríticas o andesíticas fracturadas. Las rocas están afectadas por una falla normal de rumbo N30°W, desplazando los bloques unos 30 m, la cual muy posiblemente tiene relación con el sistema de fallas ubicadas en el Tajo Botija. Bordeando este cuerpo intrusivo tenemos la secuencia de transición saprock de unos 20 a 45 m de espesor, identificados por sus valores de resistividad (2000 - 3395 Ohm-m). Cubriendo a las dos anteriores unidades, sobreyace una gruesa secuencia arcillo-limosa correspondiente al saprolito, con espesores entre 15 y 140 m, con valores de resistividad entre 467 y 1308 Ohm-m. Cubiertos por depósitos aluviales (paleocauces) con resistividades entre 20 y 111

Ohm-m y localmente se ubican depósitos coluviales en promontorios aislados con valores de resistividades entre 3395 y 11097 Ohm-m.

Figura 4-13 Línea geofísica 03-P12



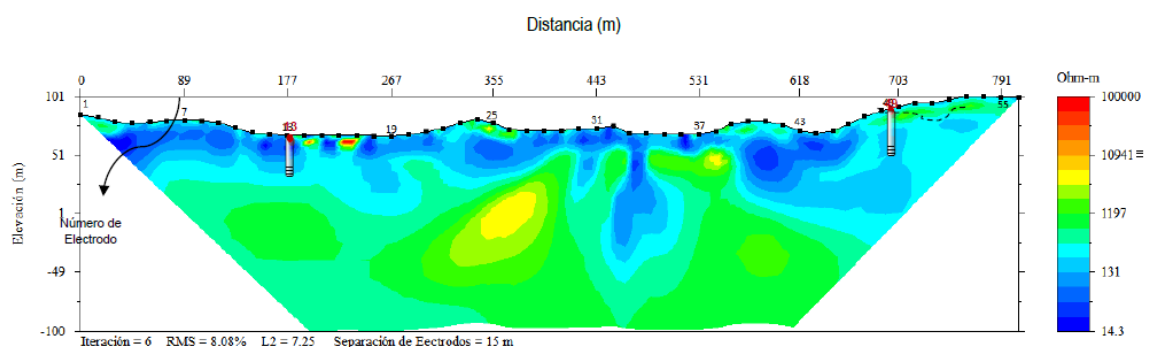
Fuente: Hydrogeocol Environment INC. (2020)

Línea Geofísica 12-SBN

Se ubica en el sector denominado como San Benito, al este del Tajo Botija, ubicada fuera de las instalaciones del área minera. Tiene una longitud de 800 m en dirección N25°E desde su punto inicial con coordenadas 976709.67 m N y 541709.4 m E y alcanza una profundidad de 133 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-14 donde se diferencian principalmente cinco unidades, definidas por los valores de resistividad real. La más antigua se encuentra en la parte central como un cuerpo de roca ígnea altamente meteorizada asociado al saprock con valores de resistividad entre 6052 y 8482 Ohm-m, pasando a saprolito en los niveles inferiores con valores de resistividad entre 1061 y 1191 Ohm-m y espesor hasta los 130 m. Sobreyace una capa de depósitos aluviales (paleocauces) que reflejan resistividades entre 14.2 a 130 Ohm-m y depósitos coluviales pequeños y aislados de espesor variable con resistividad entre 10913 hasta 33180 Ohm-m.

Figura 4-14 Línea geofísica 12-SBN



Convenciones: ● Punto de Perforación Sugerido.

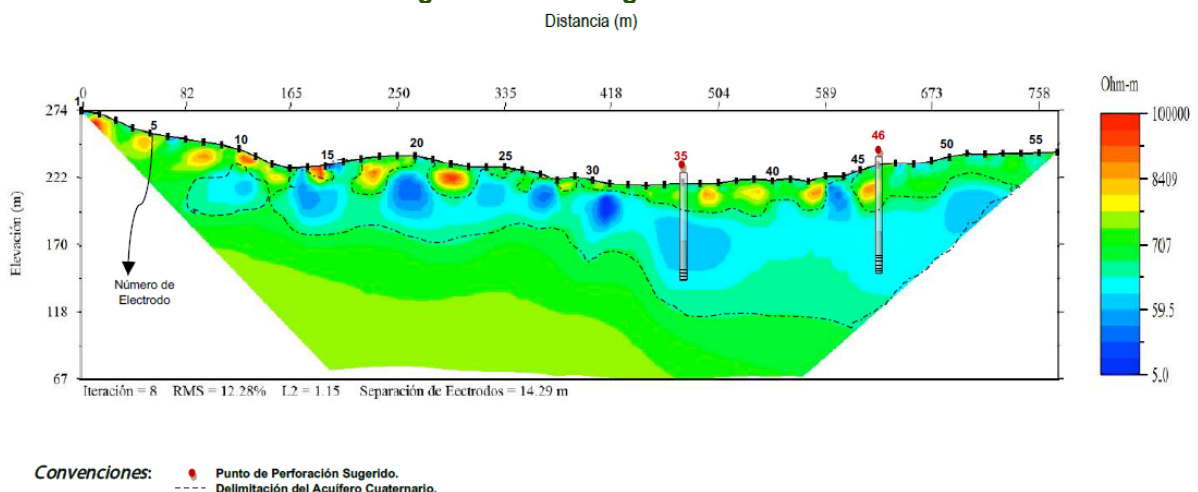
Fuente: Hydrogeocol Environment INC. (2020)

Línea Geofísica 07-OA

Se ubica en el borde Occidental de la vía que conduce a las oficinas de Ambiente del proyecto mina de Cobre Panamá, al suroeste del Botadero Sur. Tiene una longitud de 800 m en dirección N60°W desde su punto inicial, con coordenadas 975280 m N y 537254.6 m E y alcanza una profundidad de investigación de 133.33 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-15 donde se diferencian principalmente cinco (5) unidades, definidas por los valores de resistividad real. En la parte inferior se tiene la unidad más antigua, representada por rocas de composición granodiorítica o andesítica con valores altos de resistividad mayores a 31306.7 Ohm-m, rodeados de material meteorizado asociado a estos cuerpos como saprock, identificados por sus valores de resistividad (2632.5 - 4558.0 Ohm-m); cubriendo las dos anteriores unidades se tiene una gruesa secuencia arcillo-limosa correspondiente al saprolito, con espesores mayores a 52 m, con valores de resistividad entre 545.1 y 707.07 Ohm-m. Cubiertos por depósitos aluviales (paleocauces) y localmente por depósitos coluviales representados por bloques de rocas de composición granodioríticas o andesíticas distribuidos horizontalmente, identificados con valores de resistividades mayores a 8409 Ohm-m. Estructuralmente, no se reflejan eventos tectónicos que modifiquen la secuencia estratigráfica descrita.

Figura 4-15 Línea geofísica 07-OA



Fuente: Hydrogeocol Environment INC. (2020)

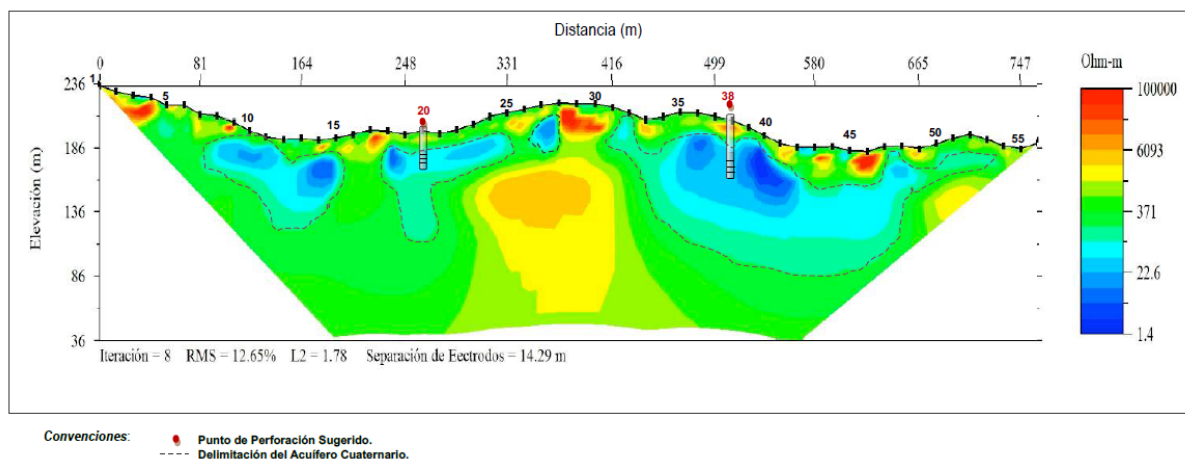
Línea Geofísica 01-G

Se ubica en el lado Occidental de la vía de ingreso al complejo minero, en cercanías a la Garita de Campo Dorado, al sur del Botadero Sur (Figura 4-4). Tiene una longitud de 800 m, en dirección N20°W, desde su punto inicial con coordenadas 974945.68 m N y 537934.63 m E, y alcanza una profundidad de investigación de 130 m.

Los resultados de la interpretación se muestran en la Figura 4-16 donde se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real. En su parte inferior central, se tiene la unidad más antigua, con valores de resistividad entre 3232 y 6093 Ohm-m que indican la ocurrencia de saprock, que representa la transición de un cuerpo ígneo, conformado en este caso por granodiorita o andesita, que gradualmente pasa de roca fresca a roca con un bajo a moderado grado de meteorización. Cubriendo a esta unidad se tiene una

secuencia de mayor espesor de saprolito, conformado por un material de granulometría fina a muy fina producto de la intensa meteorización de los cuerpos ígneos, compuesto litológicamente por arcilla y limo-arcilla, con valores de resistividad entre 196.8 y 1801.5 Ohm-m y con espesor variable de 50 hasta más de 150 m. Por encima del saprolito se tiene depósitos aluviales representados por los paleocauces, con valores de resistividad entre 22.6 y 196.8 Ohm-m, con espesores variables de hasta 75 m. Sobreyacen pequeños depósitos coluviales con valores de resistividad mayores a 4662.5 Ohm-m. Estructuralmente, no se reflejan eventos tectónicos que modifiquen la secuencia estratigráfica existente.

Figura 4-16 Línea geofísica 01-GA



Fuente: Hydrogeocol Environment INC. (2020)

5 INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS HISTÓRICAS

Con la finalidad de recabar información del subsuelo con fines hidrogeológicos y geotécnicos, se revisó la información de las perforaciones e instalación de piezómetros en el área de estudio.

5.1 PIEZÓMETROS EN EL ENTORNO DEL PROYECTO

Se cuenta con información de 28 piezómetros (10 piezómetros simples, 6 piezómetros multinivel dobles y 2 piezómetros multinivel triples) ubicados en el área de estudio y de los cuales se ha tomado en consideración los niveles piezométricos de agosto del 2020 para la interpretación del régimen hidrogeológico. La ubicación de los piezómetros respecto a la relavera corresponde a 07 piezómetros ubicados al noroeste y 13 al este. Los piezómetros respecto al Tajo Botija, 01 está ubicado en el mismo punto, 02 al este, 04 al sur y 01 al suroeste.

La relación de los piezómetros y los niveles piezométricos referenciales se muestran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Piezómetros en el entorno del proyecto

Código de fuente	Tipo de fuente	Fecha última de registro	Coordenadas (WGS 84)		Elevación (msnm)*	Profundidad Nivel Freático (m)	Elevación del Nivel Freático (msnm)
			Este (m)	Norte (m)			
MW1A	Piezómetro multinivel doble	23/05/2021	536253.00	983943.00	40.00	8.45	31.55
MW1B		23/05/2021	536255.00	983945.00	40.00	8.31	31.69
MW2A	Piezómetro multinivel doble	23/05/2021	535952.00	983426.00	50.00	2.10	47.90
MW2B		23/05/2021	535952.00	983423.00	50.00	2.25	47.75
MW3A	Piezómetro multinivel doble	23/05/2021	539151.00	982343.00	70.00	7.10	62.90
MW3B		23/05/2021	539154.00	982342.00	70.00	6.68	63.32
MW4A	Piezómetro multinivel doble	23/05/2021	539082.00	981877.00	74.00	2.60	71.40
MW4B		23/05/2021	539079.00	981879.00	74.00	2.76	71.24
MW5A	Piezómetro multinivel triple	23/05/2021	539271.00	981419.00	70.00	7.64	62.36
MW5B		23/05/2021	539273.00	981419.00	70.00	7.53	62.47
MW5C		23/05/2021	539269.00	981421.00	70.00	7.51	62.49
MW6A	Piezómetro multinivel doble	23/05/2021	539147.00	980660.00	78.00	1.30	76.70
MW6B		23/05/2021	539149.00	980662.00	78.00	5.75	72.25
MW7A	Piezómetro multinivel triple	23/05/2021	539407.00	980077.00	90.00	7.61	82.39
MW7B		23/05/2021	539407.00	980075.00	90.00	7.61	82.39
MW7C		23/05/2021	539408.00	980078.00	90.00	7.59	82.41
GW-WRDBOT-001	Piezómetro	8/09/2020	537711.00	975335.00	200.00	11.38	188.62
GW-WRDBOT-002	Piezómetro	8/09/2020	537852.00	975430.00	190.00	10.11	179.89
GW-WRDBOT-003	Piezómetro	14/08/2020	538225.00	975853.00	158.00	10.04	147.96
GW-WRDBOT-004	Piezómetro	14/05/2020	538218.00	975963.00	140.00	10.16	129.84
GW-BOR-001A	Piezómetro multinivel doble	5/10/2019	541493.00	976426.00	90.00	2.81	87.19
GW-BOR-001B		24/11/2019	541495.00	976427.00	90.00	4.99	85.01
B07-055-HG	Piezómetro	5/10/2015	537848.26	977198.52	55.00	27.60	27.40
TSF-03-GT11	Piezómetro	2/09/2014	536343.00	983256.00	40.00	3.20	36.80
TSF-1003-FT	Piezómetro	25/09/2014	536319.00	983011.00	40.00	1.01	38.99
TSF-1012-GT	Piezómetro	27/11/2013	535331.00	982826.00	80.00	0.25	79.75
TSF-10-GT	Piezómetro	3/08/2015	539014.00	981347.00	60.00	11.07	48.93
VG07-096-HG	Piezómetro	12/11/2016	534202.00	975863.00	140.00	4.62	135.38

5.2 RESULTADOS DE PRUEBAS HIDRÁULICAS EN PERFORACIONES

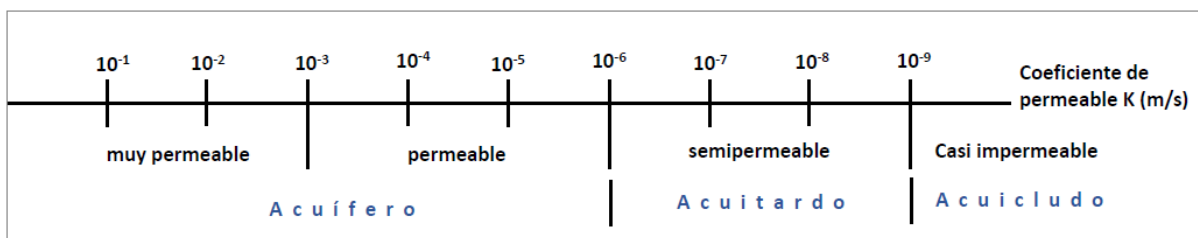
Los parámetros hidráulicos estimados en base al análisis de las pruebas hidráulicas realizadas en los piezómetros de monitoreo y en sondeos abiertos, efectuados por MPSA, se

han utilizado para identificar las unidades hidrogeológicas que existen en el área de estudio; para esto se ha desarrollado gráficas de los datos medidos y su análisis.

La mayoría de las pruebas hidráulicas revisadas han sido del tipo “slug test” con carga descendente y ascendente, y en algunos casos indican pruebas de carga constante, que se interpreta corresponden al tipo “Lefranc” (Tablas 5-2 y 5-3).

Los resultados de las pruebas indican una similitud entre las pruebas realizadas en las perforaciones versus las realizadas en los piezómetros. Las pruebas hidráulicas durante las perforaciones indican una conductividad hidráulica mínima de 7.0×10^{-11} m/s y máxima de 1.0×10^{-6} m/s, con un promedio de 7.14×10^{-8} m/s y las pruebas en los piezómetros indican una conductividad hidráulica mínima de 9.0×10^{-10} m/s y máxima de 2.0×10^{-4} m/s, con un promedio de 6.2×10^{-6} m/s; correspondiendo ambos en promedio a un acuitardo de característica típica semipermeable (Figura 5-1).

Figura 5-1 Clasificación de unidades hidrogeológicas en función de la conductividad hidráulica (m/s)



FUENTE:
ELABORACIÓN PROPIA, ADAPTADO DE LANGGUTH & VOIGT (1980)

Tabla 5-2 Resumen de parámetros hidráulicos estimados en perforaciones

Perforación	Profundidad del Intervalo		Longitud del Intervalo [m]	Transmisividad Estimada [m ² /s]	Conductividad Hidráulica [m/s]	Tipo de Prueba
	Inicio del Intervalo [mbs]	Fin del Intervalo [mbs]				
B09024	60.5	111.5	51	4.E-09	7.E-11	Prueba de pulso
	108.5	159	50.5	3.E-06	6.E-08	Slug carga descendente
				8.E-07	1.E-08	Prueba inyección gradual
	158.2	206.2	48	3.E-07	7.E-09	Slug carga descendente
				1.E-07	3.E-09	Prueba inyección gradual
B07022	205	266	61	3.E-06	5.E-08	Slug carga descendente
				1.E-06	2.E-08	Prueba inyección gradual
	266	327	61	2.E-06	4.E-08	Slug carga descendente
				2.E-06	4.E-08	Prueba inyección gradual
	327	366	39	7.E-07	2.E-08	Slug carga descendente
				1.E-07	3.E-09	Prueba inyección gradual
				9.E-09	3.E-10	Slug carga descendente
	51	402	351	2.E-06	5.E-09	Slug carga descendente
				1.E-06	3.E-09	Prueba inyección gradual
B07073	61	81	20	2.E-08	1.E-09	Prueba de pulsación
				8.E-06	4.E-07	Slug carga descendente
	79.2	131	51.8	7.E-06	1.E-07	Slug carga descendente
	130.7	198	67.3	3.E-08	5.E-10	Slug carga descendente
	190	253	63	1.E-06	2.E-08	Slug carga descendente
	249	300	51	2.E-06	4.E-08	Slug carga descendente
				3.E-07	6.E-09	Prueba inyección gradual
				3.E-07	6.E-09	Slug carga descendente
				2.E-07	4.E-09	Prueba inyección gradual

Perforación	Profundidad del Intervalo		Longitud del Intervalo [m]	Transmisividad Estimada [m ² /s]	Conductividad Hidráulica [m/s]	Tipo de Prueba
	Inicio del Intervalo [mbs]	Fin del Intervalo [mbs]				
P07080GT	40	71	31	6.E-07	2.E-08	Slug carga descendente
	71	121	50	1.E-06	2.E-08	Slug carga descendente
				3.E-08	8.E-10	Slug carga descendente
	163	214	51	2.E-06	4.E-08	Slug carga descendente
				5.E-07	9.E-09	Prueba inyección gradual
	214	264	50	1.E-07	2.E-09	Slug carga descendente
	262	319	57	7.E-08	1.E-09	Slug carga descendente
P07080GT	316	364	48	3.E-06	6.E-08	Slug carga descendente
	364	406	42	4.E-08	9.E-10	Slug carga descendente
P07080GT	388	480	92	1.E-07	2.E-09	Slug carga descendente
VG09074	28.4	51.5	23.1	3.2E-06	1.E-07	Slug carga descendente
	52.4	81.5	29.1	7.7E-06	3.E-07	Slug carga descendente
	82.5	129.5	47	4.1E-07	9.E-09	Slug carga descendente
	130.5	150.5	20	3.7E-06	2.E-07	Slug carga descendente
	151.5	174.5	23	4.2E-07	2.E-08	Slug carga descendente
	176	201.5	25.5	7.7E-06	3.E-07	Slug carga descendente
	187.5	201.5	14	1.5E-05	1.E-06	Slug carga descendente
	202.5	252.5	50	1.0E-07	2.E-09	Slug carga descendente

Nota: mbs – metros bajo superficie

Tabla 5-3 Resumen de parámetros hidráulicos estimados en pozos de monitoreo

ID de Pozo	Profundidad del Filtro del Pozo		Longitud del Filtro del Pozo [m]	Unidad Geológica	Transmisividad Estimada (T) [m ² /s]	Conductividad Hidráulica (K) [m/s]	Tipo de Prueba
	Tope Superior [mbs]	Tope Inferior [mbs]					
VG07105-HG	20.02	23.02	3.0	saprock	1.E-07	4.E-08	Slug carga descendente
VG07106-HG	47.72	50.72	3.0	lecho rocoso	9.E-06	1.E-06	Slug carga descendente
				lecho rocoso	5.E-06	7.E-07	Slug carga ascendente
				lecho rocoso	5.E-05	7.E-06	Lefranc constante
LA07100-HG	24.28	27.28	3.0	saprock	3.E-06	5.E-07	Slug carga descendente
				saprock	4.E-06	6.E-07	Slug carga ascendente
LA07101-HG	49.05	52.05	3.0	lecho rocoso	1.E-06	4.E-08	Slug carga descendente
				lecho rocoso	8.E-07	3.E-08	Slug carga ascendente
				lecho rocoso	1.E-05	4.E-07	Lefranc constante
CT07121-HG	36.85	39.85	3.0	saprock	3.E-06	3.E-07	Slug carga descendente
				saprock	2.E-06	2.E-07	Slug carga ascendente
CT07122-HG	11.00	14.00	3.0	aluvión/ saprolita	5.E-06	5.E-07	Slug carga descendente
				aluvión/ saprolita	1.E-05	1.E-06	Slug carga ascendente
				aluvión/ saprolita	4.E-06	5.E-07	Lefranc constante
BN07116-HG	17.85	20.85	3.0	saprock	1.E-06	2.E-07	Slug carga descendente
				saprock	3.E-06	7.E-07	Slug carga ascendente
BN07117-HG	26.34	27.84	1.5	saprock	7.E-04	2.E-04	Slug carga ascendente
				saprock	5.E-05	1.E-05	Lefranc constante
BA07118-HG	23.04	26.04	3.0	lecho rocoso	6.E-06	1.E-06	Slug carga descendente
				lecho rocoso	2.E-05	4.E-06	Lefranc constante
BA07119-HG	46.84	49.84	3.0	lecho rocoso	6.E-07	1.E-07	Slug carga descendente
				lecho rocoso	5.E-07	1.E-07	Slug carga ascendente

ID de Pozo	Profundidad del Filtro del Pozo		Longitud del Filtro del Pozo [m]	Unidad Geológica	Transmisividad Estimada (T) [m ² /s]	Conductividad Hidráulica (K) [m/s]	Tipo de Prueba
	Tope Superior [mbs]	Tope Inferior [mbs]					
VG07096-HG	21.84	24.84	3.0	saprock	1.E-05	2.E-06	Slug carga descendente
				saprock	2.E-05	3.E-06	Slug carga ascendente
				saprock	2.E-05	4.E-06	Lefranc constante
VG07097-HG	46.24	49.24	3.0	lecho rocoso	5.E-09	9.E-10	Slug carga ascendente
B07055-HG	29.34	32.34	3.0	saprock	9.E-07	1.E-07	Slug carga descendente
				saprock	4.E-06	6.E-07	Slug carga ascendente
B07056-HG	47.09	50.09	3.0	lecho rocoso	3.E-06	4.E-07	Slug carga descendente
				lecho rocoso	3.E-05	3.E-06	Slug carga ascendente
				lecho rocoso	1.E-05	1.E-06	Lefranc constante
CT07107-HG	45.84	48.84	3.0	lecho rocoso	7.E-05	3.E-06	Slug carga descendente
				lecho rocoso	1.E-04	4.E-06	Slug carga ascendente
				lecho rocoso	5.E-05	2.E-06	Lefranc constante
CT07124-HG	3.84	6.84	3.0	aluvión/ saprolita	1.E-05	2.E-06	Slug carga descendente
				aluvión/ saprolita	1.E-05	3.E-06	Slug carga ascendente
VG09024-HG(b)	62.87	101.00	38.13	lecho rocoso	5.E-06	1.E-07	Lefranc variable
	62.87	101.00	38.13	lecho rocoso	4.E-06	1.E-07	Slug carga descendente
	99.04	170.00	70.96	lecho rocoso	8.E-07	1.E-08	Slug carga descendente
	168.02	284.00	115.98	lecho rocoso	8.E-07	7.E-09	Slug carga descendente
	279.02	398.00	118.98	lecho rocoso	9.E-06	8.E-08	Slug carga descendente

Nota: mbs – metros bajo superficie

5.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA POR LITOLOGÍA

Los valores de la conductividad hidráulica (permeabilidad) se estimaron en función de los datos de logueos y los resultados de las pruebas de conductividad hidráulica realizadas en los sondeos hidrogeológicos (Ver Tabla 5-4 al Tabla 5-6) en las diferentes litologías. En la Tabla 5-7 se muestran los valores promedios (media geométrica) de la conductividad hidráulica para las distintas litologías presentes en el área de estudio (Litología saprock, lecho rocoso y aluvión/saprolito).

Tabla 5-4 Resumen de conductividades hidráulicas en litología saprock

Pozo	Intervalo de Prueba (mbs)		Profundidad promedio (m)	K (m/s)	K Promedio (m/s)	Método de Prueba	Confiabilidad de Prueba
	De	A					
Saprock							
VG07105-HG	20.02	23.02	21.52	4.00E-08	4.0E-08	Slug carga descendente	Moderada
LA07100-HG	24.28	27.28	25.78	5.00E-07	5.5E-07	Slug carga descendente	Moderada
	24.28	27.28	25.78	6.00E-07		Slug carga ascendente	Moderada
CT07121-HG	36.85	39.85	38.35	3.00E-07	2.5E-07	Slug carga descendente	Moderada
	36.85	39.85	38.35	2.00E-07		Slug carga ascendente	Moderada
BN07116-HG	17.85	20.85	19.35	2.00E-07	4.5E-07	Slug carga descendente	Moderada
	17.85	20.85	19.35	7.00E-07		Slug carga ascendente	Moderada
BN07117-HG	26.34	27.84	27.09	2.00E-04	1.1E-04	Slug carga ascendente	Moderada
	26.34	27.84	27.09	1.00E-05		Lefranc constante	Moderada
VG07096-HG	21.84	24.84	23.34	2.00E-06	3.0E-06	Slug carga descendente	Moderada
	21.84	24.84	23.34	3.00E-06		Slug carga ascendente	Moderada
	21.84	24.84	23.34	4.00E-06		Lefranc constante	Moderada
B07055-HG	29.34	32.34	30.84	1.00E-07	3.5E-07	Slug carga descendente	Moderada
	29.34	32.34	30.84	6.00E-07		Slug carga ascendente	Moderada
Promedio Geométrico					8.3E-07		
				Máximo	1.1E-04	Número de Pruebas:	14
				Mínimo	4.0E-08	Número de Ubicaciones:	14
Desviación Standard (% promedio)					4392%	Número de Pozos:	7
90 Percentil					4.4E-05		
10 Percentil					1.7E-07		

Tabla 5-5 Resumen de conductividades hidráulicas en lecho rocoso

Pozo	Intervalo de Prueba (mbs)		Profundidad promedio (m)	K (m/s)	K Promedio (m/s)	Método de Prueba	Confiabilidad de Prueba
	De	A					
Lecho Rocosó							
BA07118-HG	23.04	26.04	24.54	1.00E-06	2.50E-06	Slug carga descendente	Moderada
	23.04	26.04	24.54	4.00E-06		Lefranc constante	Moderada
BA07119-HG	46.84	49.84	48.34	1.00E-07	1.00E-07	Slug carga descendente	Moderada
	46.84	49.84	48.34	1.00E-07		Slug carga ascendente	Moderada
VG09024-HG(b)	62.87	101	81.935	1.00E-07	5.94E-08	Lefranc variable	Moderada
	62.87	101	81.935	1.00E-07		Slug carga descendente	Moderada
	99.04	170	134.52	1.00E-08		Sug carga descendente	Moderada
	168.02	284	226.01	7.00E-09		Slug carga descendente	Moderada
	279.02	398	338.51	8.00E-08		Slug carga descendente	Moderada
VG07097-HG	46.24	49.24	47.74	9.00E-10	9.00E-10	Slug carga ascendente	Moderada
B07056-HG	47.09	50.09	48.59	4.00E-07	4.0E-07	Slug carga descendente	Moderada
	47.09	50.09	48.59	3.00E-06		Slug carga ascendente	Moderada
	47.09	50.09	48.59	1.00E-06		Lefranc constante	Moderada
CT07107-HG	45.84	48.84	47.34	3.00E-06	3.0E-06	Slug carga descendente	Moderada
	45.84	48.84	47.34	4.00E-06		Slug carga ascendente	Moderada
	45.84	48.84	47.34	2.00E-06		Lefranc constante	Moderada
VG07106-HG	47.72	50.72	49.22	1.00E-06	2.9E-06	Slug carga descendente	Moderada
	47.72	50.72	49.22	7.00E-07		Slug carga ascendente	Moderada
	47.72	50.72	49.22	7.00E-06		Lefranc constante	Moderada
LA07101-HG	49.05	52.05	50.55	4.00E-08	1.6E-07	Slug carga descendente	Moderada
	49.05	52.05	50.55	3.00E-08		Slug carga ascendente	Moderada
	49.05	52.05	50.55	4.00E-07		Lefranc constante	Moderada
Promedio Geométrico					2.3E-07		
				Máximo	3.0E-06	Número de Pruebas:	22
				Mínimo	9.0E-10	Número de Ubicaciones:	22
				Desviación Standard (% promedio)	569%	Número de Pozos:	8
				90 Percentil	2.9E-06		
				10 Percentil	4.2E-08		

Tabla 5-6 Resumen de conductividades hidráulicas en litología aluvión/saprolito

Pozo	Intervalo de Prueba (mbs)		Profundidad promedio (m)	K (m/s)	K Promedio (m/s)	Método de Prueba	Confiabilidad de Prueba
	De	A					
Aluvión/Saprolito							
CT07124-HG	3.84	6.84	5.3	2.00E-06	2.5E-06	Slug carga descendente	Moderada
	3.84	6.84	5.3	3.00E-06		Slug carga ascendente	Moderada
CT07122-HG	11	14	12.5	5.00E-07	6.7E-07	Slug carga descendente	Moderada
	11	14	12.5	1.00E-06		Slug carga ascendente	Moderada
	11	14	12.5	5.00E-07		Lefranc constante	Moderada
Promedio Geométrico					1.3E-06		
				Máximo	2.5E-06	Número de Pruebas:	5
				Mínimo	6.7E-07	Número de Ubicaciones:	5
Desviación Standard (% promedio)					71%	Número de Pozos:	2
				90 Percentil	2.3E-06		
				10 Percentil	8.5E-07		

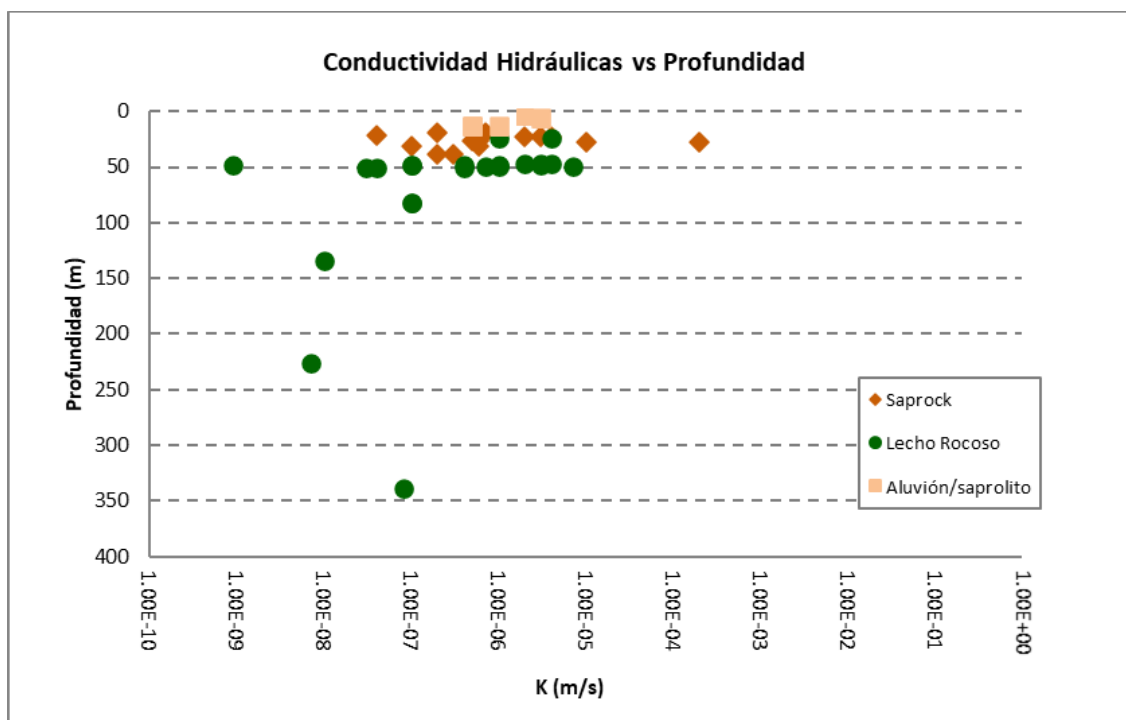
A continuación, se presenta el resumen de los valores promedios (media geométrica) de la conductividad hidráulica para las distintas litologías presentadas en las Tablas 5-4 al 5-6.

Tabla 5-7 Resumen de conductividad hidráulica por litología

Litología	Número de Pruebas	Conductividad Hidráulica Media Geométrica (m/s)
Saprock	14	8.30E-07
Lecho Rocosó	22	2.30E-07
Aluvión/Saprolito	5	1.30E-06

En base a la tabla anterior, los resultados indican que la litología saprock presenta una conductividad hidráulica promedio (media geométrica) de 8.30E-07 m/s, el lecho rocoso 2.30E-07 m/s y la litología aluvión/saprolito 1.30E-06 m/s, los datos corresponden a un acuitardo.

Figura 5-2 Conductividades hidráulicas vs profundidad por unidades litológicas



En la Figura 5-2 se muestra la distribución en profundidad de las conductividades hidráulicas de las unidades litológicas descritas en las tablas 5-4 al 5-6, estas conductividades presentan una mayor concentración entre los 4 y 50 m de profundidad, representando el rango de permeabilidades características en el área de estudio. Por otro lado, la Figura 5-2 muestra permeabilidades menores puntualmente pasado los 50 m, esto se debe a que a partir de esta profundidad el macizo rocoso pasa de ser de una roca alterada y fracturada a una roca poco fractura e inalterada (roca fresca).

5.4 MEDICIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA

La información de niveles de agua subterránea fue proporcionada por MPSA. Los datos abarcan 6 piezómetros desde noviembre del 2012 hasta noviembre del 2016, y de 22 piezómetros desde febrero del 2019 hasta mayo del 2021 (ver ítem 5.1).

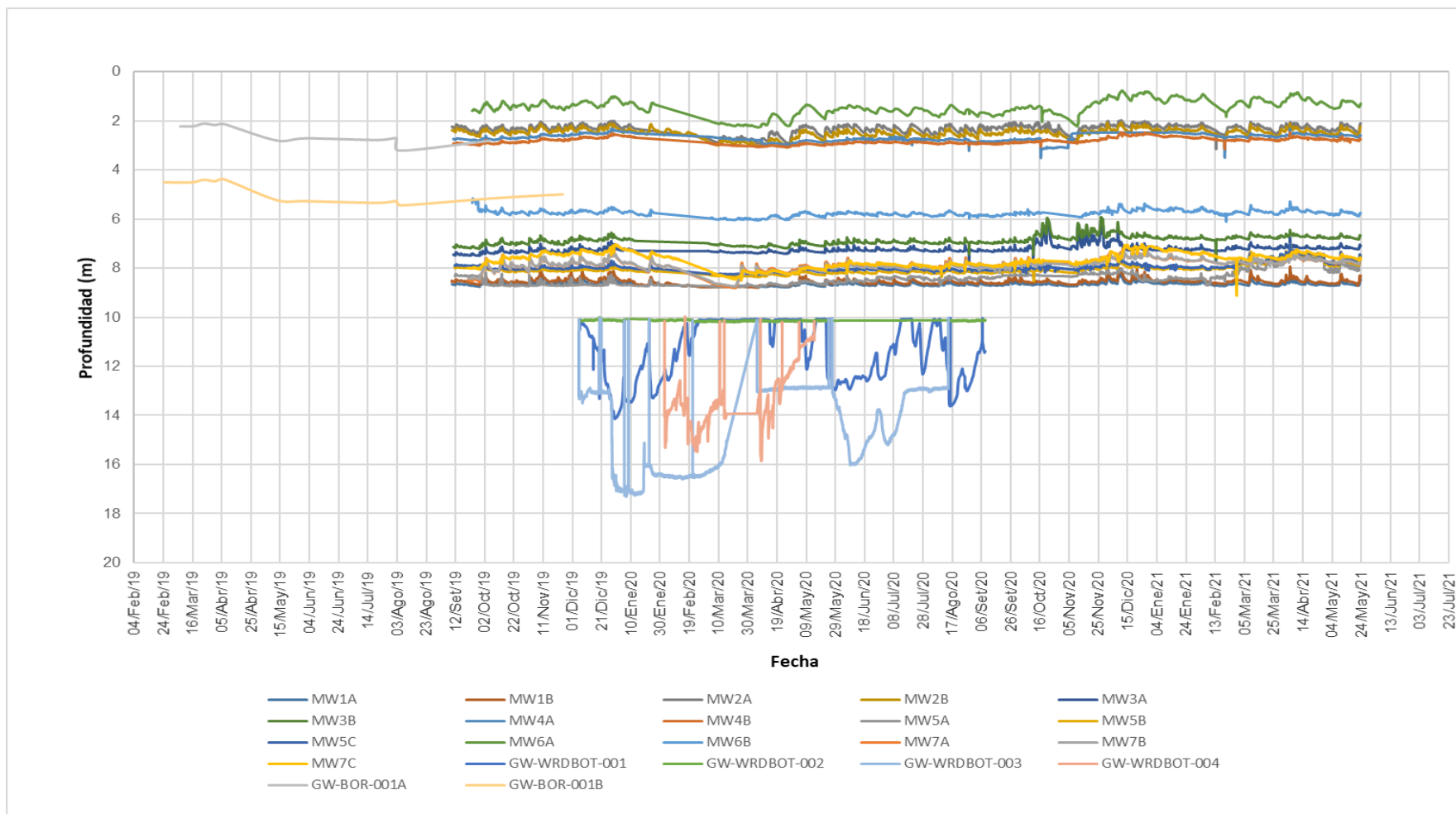
En la Figura 5-3 se muestra el hidrograma de registros históricos de los niveles de agua subterránea de 22 piezómetros desde febrero del 2019 hasta mayo del 2021, ubicados dentro del área de estudio.

Las fluctuaciones de los niveles piezométricos presentan diferentes variaciones, interpretándose que la variación depende de los siguientes factores: 1) los ingresos de agua en las zonas saturadas y 2) su proximidad a la superficie.

Las fluctuaciones del nivel del agua subterránea recientes (febrero 2019 – mayo 2021) en los piezómetros del área de estudio (22 piezómetros) presentan la siguiente dinámica del agua subterránea:

- Niveles medidos desde 1.0 hasta 3.0 m de profundidad, que presentan variaciones máximas de 1.0 m que obedecerían a respuestas climáticas (precipitaciones) por factores estacionales y a su cercanía a la superficie.
- Niveles medidos desde 4.5 m hasta 9.0 m de profundidad, que presentan variaciones máximas de 1.5 m que obedecerían a respuestas climáticas por factores estacionales.
- Niveles medidos desde 10.0 m hasta 17.0 m de profundidad, que presentan variaciones máximas de 8.0 m que obedecerían principalmente a la influencia de las labores mineras debido a la cercanía al tajo (labores de explotación y bombeo del tajo). Cabe indicar que el piezómetro GW-WRDBOT-002 se encuentra también cercano al Tajo Botija, pero no presenta la misma dinámica del agua subterránea comparando con los otros piezómetros cercanos. Además, manifiesta un nivel constante sin reacción a los cambios estacionales, esto se debería probablemente a que este piezómetro no se encontraría instalado correctamente o se encuentra averiado.

Figura 5-3 Hidrograma de niveles piezométricos en el área de estudio



6 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

6.1 PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS

En base a la información proporcionada por MPSA, se tienen datos de los parámetros fisicoquímicos (pH y conductividad eléctrica) y de la calidad del agua de 18 piezómetros ubicados en el área de estudio.

La Tabla 6-1 presenta los parámetros fisicoquímicos (pH y conductividad eléctrica) de los puntos de monitoreo donde han realizado la toma de muestras de agua para análisis químico en laboratorio, en el periodo febrero y marzo de 2021.

Tabla 6-1 Resumen de los parámetros fisicoquímicos de piezómetros

Código de fuente	Tipo de fuente	Coordenadas (WGS 84)		Elevación (msnm)*	Profundidad Nivel Freático (m)	Parámetros Fisicoquímicos (Febrero - Marzo 2021)	
		Este (m)	Norte (m)			pH	Conductividad Eléctrica (uS/cm)
MW1A	Piezómetro multinivel doble	536253.00	983943.00	40	8.45	7.85	276.6
MW1B		536255.00	983945.00	40	8.31	7.41	403.8
MW2A	Piezómetro multinivel doble	535952.00	983426.00	50	2.10	7.07	45.3
MW2B		535952.00	983423.00	50	2.25	7.94	231.5
MW3A	Piezómetro multinivel doble	539151.00	982343.00	70	7.10	6.95	175.7
MW3B		539154.00	982342.00	70	6.68	7.15	283.7
MW4A	Piezómetro multinivel doble	539082.00	981877.00	74	2.60	7.22	178
MW4B		539079.00	981879.00	74	2.76	6.83	213.9
MW5A	Piezómetro multinivel triple	539271.00	981419.00	70	7.64	6.9	149.6
MW5B		539273.00	981419.00	70	7.53	8.15	365.4
MW5C		539269.00	981421.00	70	7.51	8.05	336.2
MW6A	Piezómetro multinivel doble	539147.00	980660.00	78	1.30	6.40	56.5
MW6B		539149.00	980662.00	78	5.75	6.6	367
MW7A	Piezómetro multinivel triple	539407.00	980077.00	90	7.61	6.56	164.5
MW7B		539407.00	980075.00	90	7.61	6.73	279.4
MW7C		539408.00	980078.00	90	7.59	6.9	341.6
GW-BOR-001A	Piezómetro doble	541493.00	976426.00	90	2.81	11.76	1866
GW-BOR-001B		541495.00	976427.00	90	4.99	11.31	830

*Elevación estimada en base a la topografía provista por MPSA.

6.1.1 ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE CAMPO

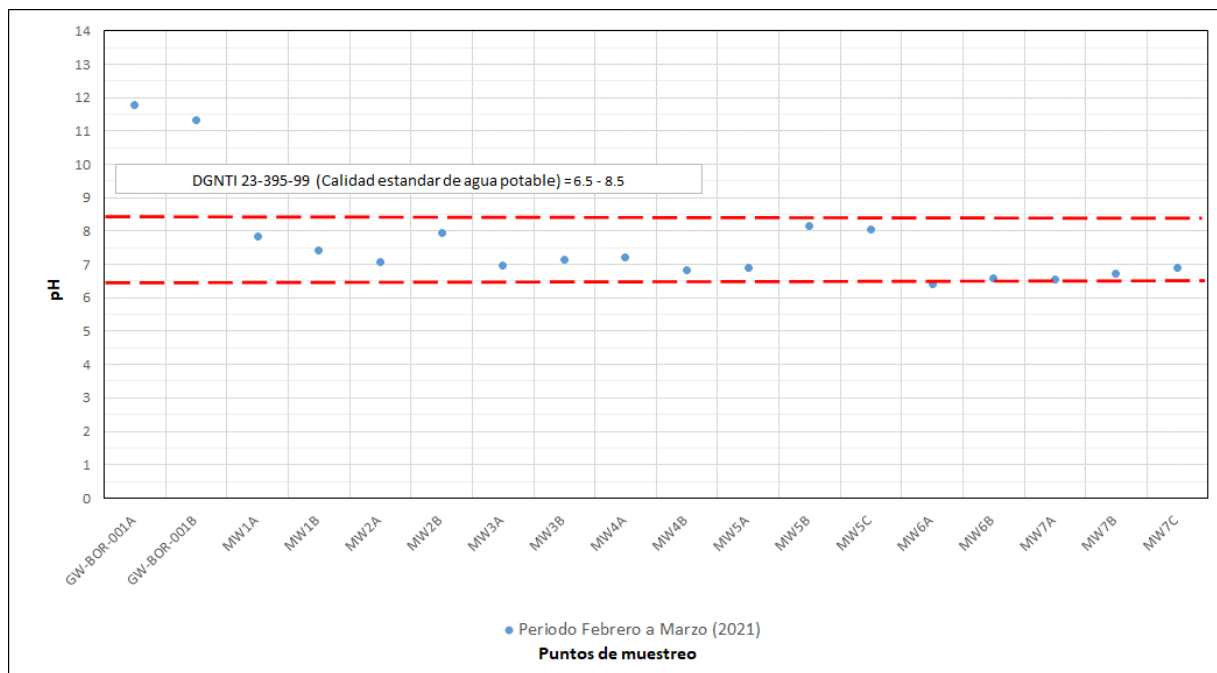
El análisis de los parámetros de campo se muestra a continuación:

pH

En conformidad a los valores de potencial de hidrógeno (pH) podemos indicar que la mayoría de las fuentes de agua muestran un pH neutro, con un valor promedio de 7.16; las ligeras variaciones de pH indican un rango entre aguas ligeramente ácidas a moderadamente básicas con valores comprendidos entre 6.4 (MW6A) y 8.15 (MW5B).

La mayoría de los valores de pH se encuentran dentro de los Estándares de Calidad de Agua de Panamá (DGNTI 23-395-99) para calidad de aguas potabilizadas. Cabe indicar que se presentan valores alcalinos muy fuertes en los piezómetros GW-BOR-001A y GW-BOR-001B, con valores de pH entre 11.76 y 11.31 respectivamente (ver Figura 6-1).

Figura 6-1 Valores de pH en el área de estudio



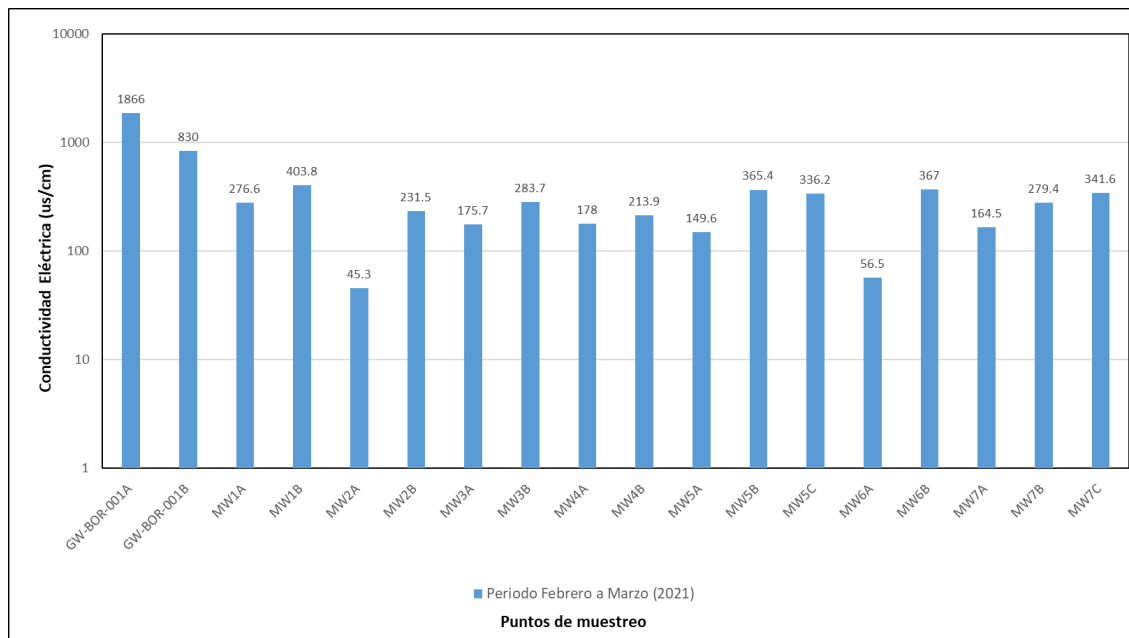
Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) del agua presenta las siguientes características:

- Baja conductividad eléctrica, con valores que varían entre 45.3 $\mu\text{S/cm}$ (MW2A) a 403.8 $\mu\text{S/cm}$ (MW1B).
- Moderada conductividad eléctrica con valores de los piezómetros GW-BOR-001A y GW-BOR-001B de 1866 $\mu\text{S/cm}$ y 830 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente.

Cabe indicar que los Estándares de Calidad de Agua de Panamá (DGNTI 23-395-99) para calidad de aguas potabilizadas, no regulan la conductividad eléctrica, por lo cual no se realizó un análisis de este parámetro.

Figura 6-2 Valores de conductividad eléctrica en el área de estudio



6.2 PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS DE LABORATORIO

6.2.1 RESULTADOS DE PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS

Los resultados de los análisis hidroquímicos de laboratorio fueron analizados, para lo cual inicialmente se calculó el error del balance iónico (EBI), con la finalidad de confirmar que los análisis se encuentran dentro de los rangos permitidos, esto es $\pm 10\%$; sin embargo, 07 muestras de las 18 han arrojado EBI bastante alto, desde 11.55% hasta 83.4% (Tabla Anexo I), lo que no permitirá realizar un análisis químico de dichos resultados y las interpretaciones serán referenciales.

A continuación, se describen los parámetros hallados:

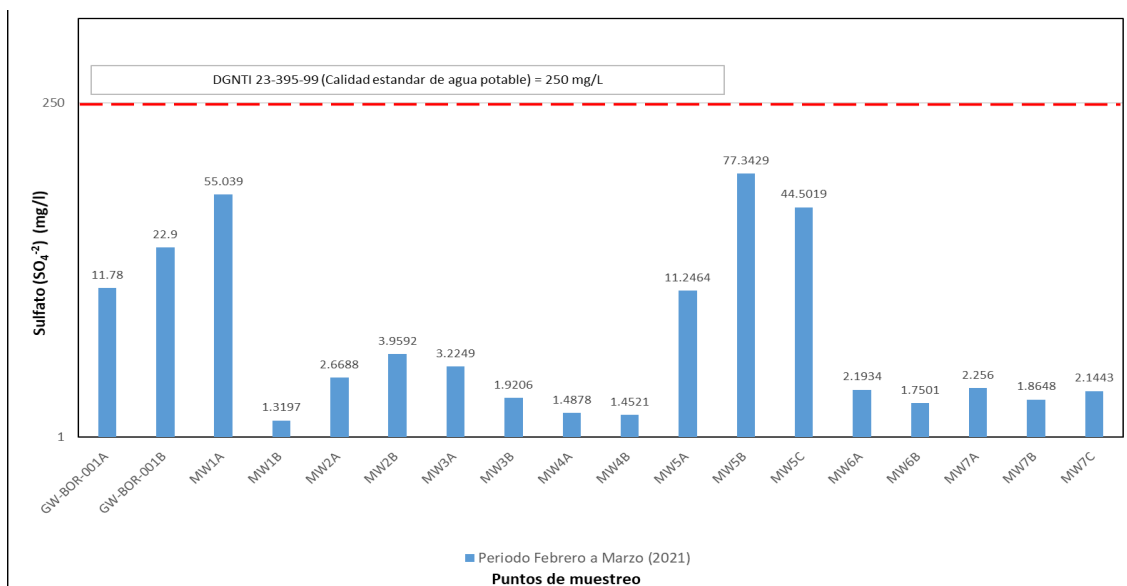
Aniones

Los aniones que predominan en el sistema son los bicarbonatos, en menor proporción los sulfatos y con cantidades mínimas los cloruros.

Sulfatos

Los resultados de laboratorio para sulfatos presentan valores de concentración entre 1.319 mg/l (MW1B) a 77.342 mg/l (MW5B), tal como se muestra en la Figura 6-3. Los valores se encuentran por debajo de lo que establecen los Estándares de Calidad de Agua de Panamá (DGNTI 23-395-99) para calidad de aguas potabilizadas.

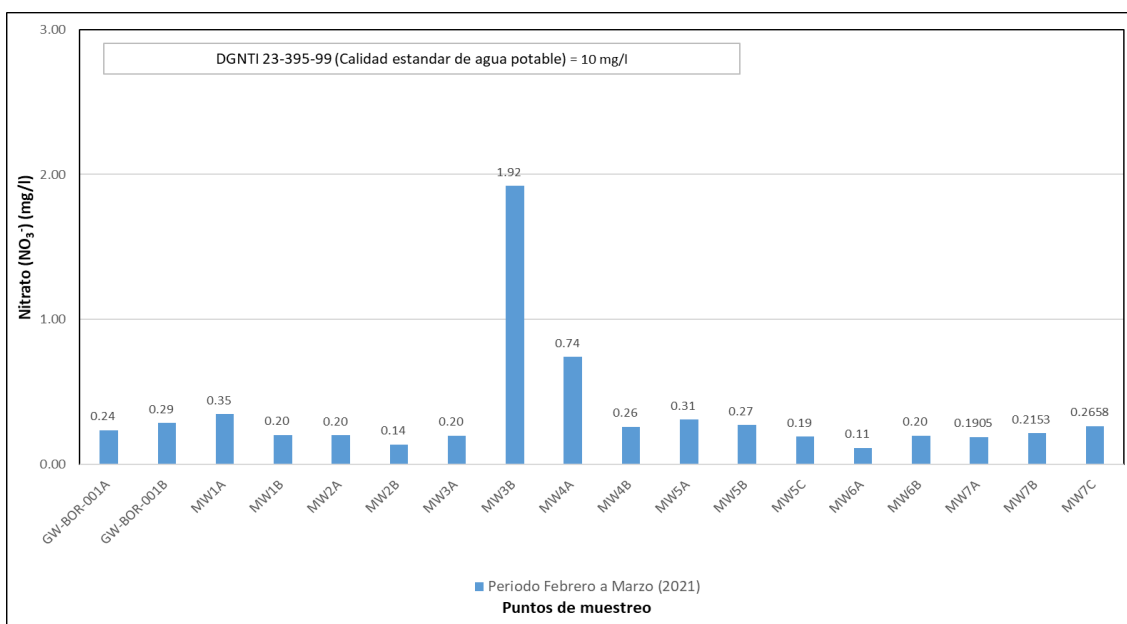
Figura 6-3 Valores de sulfatos (SO₄) en el área de estudio



Nitratos

Los Nitratos derivan de forma natural y rara como el resultado de la disolución de rocas que los contienen; otra procedencia se produce por oxidación bacteriana de materia orgánica en zonas de semi-saturamiento y/o no saturada que sobreyace a las zonas saturadas del sistema. En teoría se define que los contenidos de nitratos en las aguas subterráneas en condiciones naturales raramente exceden los 10 mg/l. Para las muestras analizadas en el presente estudio, esta condición se cumple, ya que el valor de concentración más alta es 1.92 mg/l en el piezómetro MW3B (ver Figura 6-4). En general, todos los valores se encuentran por debajo del valor referencial de 10 mg/l, establecido en los Estándares de Calidad de Agua de Panamá (DGNTI 23-395-99) para calidad de aguas potabilizadas.

Figura 6-4 Valores de nitratos (NO₃) en el área de estudio

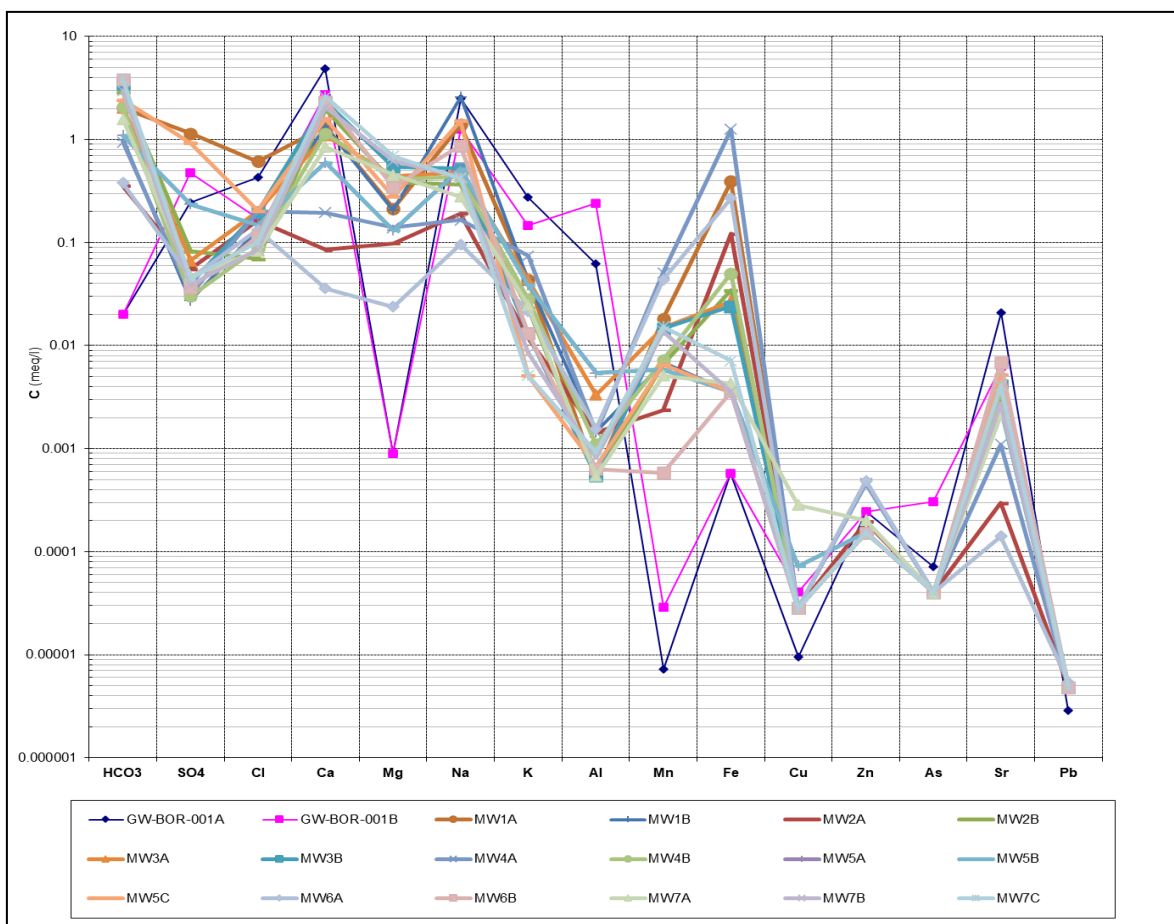


Cationes

Los principales cationes dominantes, obtenidos del monitoreo en el periodo febrero y marzo de 2021, presentan 2 tendencias: $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ y $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$. El Ca presenta un promedio de 31.66 mg/l, con un mínimo de 0.72 mg/l hasta un máximo de 98.32 mg/l; así también el Na presenta un promedio de 20.31 mg/l, con un mínimo de 2.2 mg/l hasta un máximo de 59 mg/l, siendo estos dos (Ca y Na), los cationes con mayor concentración en las muestras de agua.

En la Figura 6-5 se muestran las concentraciones de los principales iones (aniones y cationes) de todas las muestras analizadas, donde se aprecia en general las mayores concentraciones de HCO_3^- , Ca y Na, así como también se visualizan las concentraciones de los metales pesados de K y Al. Además, el diagrama resalta la alta concentración de Fe.

Figura 6-5 Diagrama Schöller de muestras de agua



6.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS

Los resultados del análisis químico de agua en laboratorio fueron obtenidos en el periodo febrero y marzo de 2021, donde indicaron que las aguas en general presentan un pH neutro, con un valor promedio de 7.16, con ligeras variaciones entre aguas ligeramente ácidas a moderadamente básicas con valores comprendidos entre 6.4 (MW6A) y 8.15 (MW5B). La conductividad eléctrica en general fluctúa entre 45.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (MW2A) a 403.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (MW1B), lo que indica aguas dulces y los contenidos de sulfato varían entre 1.31 mg/l (MW1B) hasta 77.34 mg/l (MW5B). Cabe indicar que la excepción a lo mencionado anteriormente con respecto al pH y CE se da en los piezómetros GW-BOR-001A y GW-BOR-001B, que presentan valores pH básico muy fuerte (11.76 y 11.31) y conductividades eléctricas moderadas (1866 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 830 $\mu\text{S}/\text{cm}$), que podría estar relacionado a la presencia de materiales carbonatados.

Del análisis de los resultados químicos, considerando los cationes y aniones mayoritarios, se ha determinado los tipos de agua (ver Tabla 6-2), los cuales han sido agrupados mediante un diagrama de Piper (Figura 6-6), determinando cuatro (04) grupos, pertenecientes casi en su totalidad a la familia de las aguas bicarbonatadas:

1. Agua de la familia clorurada cálcica;
2. Agua de la familia sulfatada cálcica;
3. Agua de la familia bicarbonatada sódica; y
4. Agua de la familia bicarbonatada cálcica.

Tabla 6-2 Clasificación de los tipos de agua

Grupo	Código	Tipo de agua
1	GW-BOR-001A	Cl-SO ₄ -Ca-Na
2	GW-BOR-001B	SO ₄ -Cl-Ca-Na (Si)
3	MW1A	HCO ₃ -SO ₄ -Na-Ca (Si)
3	MW1B	HCO ₃ -Na-Ca (Si)
3	MW2A	HCO ₃ -Cl-Na-Mg-Ca (Si-Fe)
3	MW5B	HCO ₃ -SO ₄ -Na-Ca (Si)
3	MW6A	HCO ₃ -Cl-Na-Mn-Ca (Fe-Si)
4	MW2B	HCO ₃ -Ca (Si)
4	MW3A	HCO ₃ -Ca-Na-Mg (Si)
4	MW3B	HCO ₃ -Ca (Si)
4	MW4A	HCO ₃ -Ca-Na-Mg (Fe-Si)
4	MW4B	HCO ₃ -Ca-Na-Mg (Si)
4	MW5A	HCO ₃ -Ca-Na (Si)
4	MW5C	HCO ₃ -SO ₄ -Ca-Na (Si)
4	MW6B	HCO ₃ -Ca-Na (Si)
4	MW7A	HCO ₃ -Ca-Mg (Si)
4	MW7B	HCO ₃ -Ca (Si)
4	MW7C	HCO ₃ -Ca (Si)

Familia Clorurada Cálcica: En este grupo se tiene 01 piezómetro (GW-BOR-001A), que representa una mezcla de aguas subterráneas cloruradas y sulfatadas, con cationes dominantes de calcio y sodio ($\text{Cl-SO}_4\text{-Ca-Na}$), originados posiblemente por reacción del agua subterránea con rocas volcánicas andesíticas porfíricas.

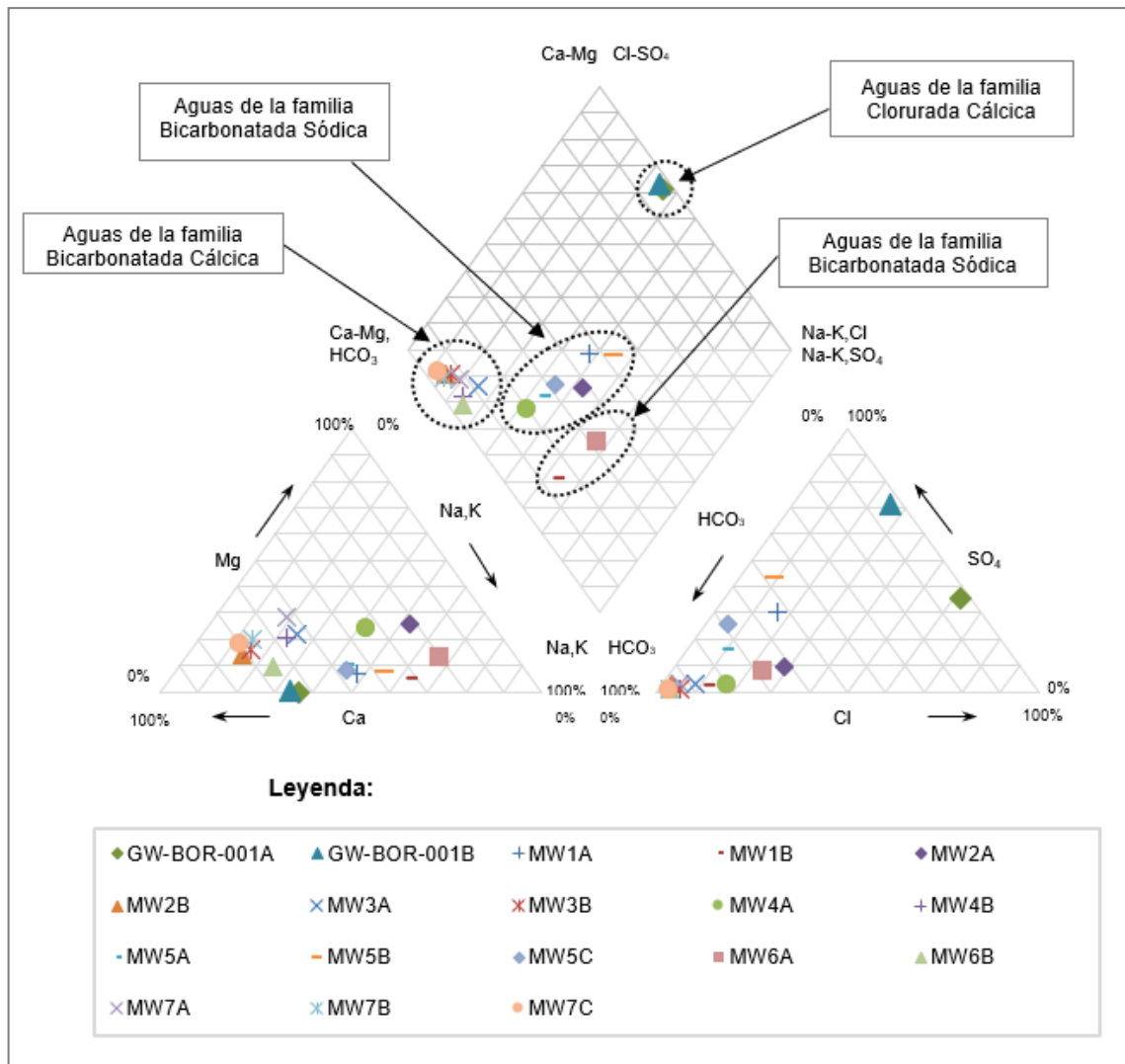
Familia Sulfatada Cálcica: En este grupo se tienen 01 piezómetro (GW-BOR-001B), representan una mezcla de aguas subterráneas sulfatadas y cloruradas, con cationes dominantes de calcio y sodio, y presencia de sílice ($\text{SO}_4\text{-Cl-Ca-Na (Si)}$), originados posiblemente por reacción del agua subterránea con rocas volcánicas andesíticas porfíricas, y con mayor incidencia de zonas de mineralización con presencia de sulfuros (pirita).

Familia Bicarbonatada Sódica: Dentro de este grupo se tienen 05 piezómetros (MW1A, MW1B y MW2A, MW5B y MW6A), el anión dominante es el bicarbonato con algunas muestras con presencia de sulfatos y cloruros, y con catión dominante de sodio y algunas muestras con presencia de calcio, magnesio, manganeso y calcio, y sílice; relacionadas posiblemente a rocas intrusivas granodioríticas. Las aguas de este grupo constituyen una transición de aguas bicarbonatadas sódicas a bicarbonatadas cálcicas. Se interpreta que el agua subterránea es de un sistema de flujo local.

Familia Bicarbonatada Cálcica: En este grupo se tienen 10 piezómetros (MW2B, MW3A, MW3B, MW4A, MW4B, MW5A, MW5C, MW6B, MW7A, MW7B y MW7C), predomina el anión bicarbonato con el catión calcio, y en menor cantidad el sodio y magnesio, y sílice; relacionadas posiblemente a rocas intrusivas granodioríticas. Se interpreta que el agua subterránea es de un sistema de flujo local.

En conclusión, la hidroquímica de las aguas subterráneas en el periodo febrero y marzo del 2021, en base a los iones mayoritarios, indican que las aguas subterráneas analizadas presentan un dominio del anión bicarbonato (HCO_3), a excepción de las muestras de los piezómetros GW-BOR-001A y GW-BOR-001B donde se tiene dominio de los aniones de cloruro y sulfato. Respecto a los cationes, el catión predominante del sistema es calcio, mientras que los cationes sodio (Na), magnesio (Mg) y potasio (K) varían indistintamente.

Figura 6-6 Diagrama Piper



7 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

7.1 MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio está conformada por la Formación Tucué, compuestas por lavas andesíticas-basálticas y presenta intrusiones de la Formación Petaquilla compuestas por rocas intrusivas granodioríticas.

Los saprolitos originados por la meteorización intensa de las formaciones geológicas antes mencionadas, cubren las partes bajas del valle, cauces de ríos y quebradas.

7.2 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

El concepto de la unidad hidrogeológica surge de la necesidad de agrupar los materiales litológicos con comportamientos hidráulicos similares. La información geológica de los diferentes materiales presentes en la zona de estudio, su grado de fracturación, su grado de meteorización y los ensayos hidráulicos realizados en las perforaciones hidrogeológicas a distintos niveles de profundidad; estos datos mencionados permitieron establecer 01 unidad hidrogeológica (UH-01), la cual se detalla a continuación:

7.2.1 Unidad Hidrogeológica UH-01

Esta unidad hidrogeológica de manera global está constituida por rocas altamente meteorizadas (saprolitos) y rocas frescas de las formaciones Tucué (lavas andesíticas-basálticas) y Petaquilla (cuerpo intrusivo granodiorítico).

La composición litológica de cada uno de estos depósitos y formaciones geológicas es variada, teniendo rocas volcánicas e intrusivas altamente meteorizadas a frescas, estas condiciones litológicas generan un contraste o variabilidad de los valores de conductividad hidráulica, permitiendo generar 02 sub-unidades hidrogeológicas (UH-01A y UH-01B) asociadas a dicho comportamiento (ver Tabla 7-1), como se describe a continuación:

UH-1A: Es una sub-unidad que se encuentra constituida por saprolitos. Litológicamente los saprolitos están compuestos por roca altamente meteorizada, constituyendo arcillas o gravas donde aún se puede apreciar estructuras de la roca original, y está distribuido como cobertura en toda el área de estudio.

En resumen, esta sub-unidad se caracteriza por ser un acuitardo con una conductividad hidráulica media de $1.30E-06$ m/s. Tipológicamente se podría comportar como un acuífero permeable de buen aprovechamiento hídrico.

UH-1B: Esta sub-unidad está conformada por rocas frescas y ligeramente meteorizadas (saprock) de las formaciones Tucué y Petaquilla y está distribuido en toda el área de estudio hasta los 398 m de profundidad. Según datos de perforaciones, se caracteriza por estar compuesta por rocas ligeramente meteorizadas (sapock) y rocas frescas (lecho rocoso) de composición volcánica andesítica-basáltica e intrusiva granodiorítica. Esta sub-unidad se caracteriza por ser un acuitardo con una conductividad hidráulica media a baja ($4.16E-07$ m/s). Tipológicamente se comporta como un acuitardo de bajo aprovechamiento hídrico.

Tabla 7-1 Clasificación de Unidades Hidrogeológicas.

Unidad Hidrogeológica	Subunidades Hidrogeológicas	K (m/s)	Tipo
UH-01	UH-01A	1.30E-06	Acuitardo, con tendencia a acuífero
	UH-01B	4.16E-07	Acuitardo

7.3 RECARGA

Las zonas de mayor recarga se encuentran en las partes altas de las cuencas del río Petaquilla, río Caimito y río Uvero, donde aflora litología intrusiva y volcánica fracturada (aaprock), producto de sistemas estructurales que permiten tener una conectividad hidráulica de los materiales superiores con los situados en profundidad. De esta manera se permite la alimentación al sistema de flujo subterráneo, el cual posteriormente es descargado en los fondos de las quebradas, valles y zonas llanas.

El periodo de recarga, para un año promedio, se da principalmente entre los meses de mayo y diciembre (estación húmeda), en los demás meses del año se presentan eventos de recarga media, dado que parte de la precipitación se almacena en la zona no saturada del suelo y no llega a infiltrarse profundamente, manifestándose esto en la baja descarga en época de estiaje.

A continuación, se resumen los resultados en base a registros en un periodo de tiempo determinado (octubre de 2007 – diciembre de 2008) de los análisis hidrológicos presentados por Golder (2009) para el flujo base y recarga estimados.

Para un año promedio, basado en los datos promedios a largo plazo de precipitación y evapotranspiración, la variación de la recarga estimada de aguas subterráneas en las áreas de drenaje para las cuencas hidrográficas asociadas con las cinco estaciones hidrodinámicas (H1, H2, H3, H4 y H5) es aproximadamente de 402 y 1403 mm/año; en comparación, para el período del 2008 de registro, la tasa estimada de recarga de aguas subterráneas varió entre 207 y 1083 mm/año.

La relación promedio anual entre el flujo base y el caudal total observado en las cinco estaciones hidrodinámicas varía entre un 42% y un 47%.

7.4 DESCARGA

La descarga de las aguas subterráneas del sistema hidrogeológico se produce por de forma natural, producto del flujo local de aguas subterráneas en las depresiones de los niveles inferiores, que actúan como drenaje. El mecanismo de descarga se produce principalmente en los fondos de las quebradas, valles y zonas llanas, realizando un aporte continuo al caudal base del drenaje principal (río Petaquilla, río Caimito, río San Juan y afluentes).

Las zonas de descarga del agua subterránea en época de lluvias dentro del área de estudio se producen en los fondos de las quebradas, valles y zonas llanas, lo cual se manifiesta con el incremento de los niveles freáticos, así también en época de estiaje la descarga es

relativamente baja, lo cual se manifiesta con la disminución de los niveles freáticos. Cabe indicar que, en base a los registros del 2008, en un año promedio, la relación entre el flujo base y el caudal total observado varía entre un 42% y un 47%.

7.5 DIRECCIÓN DEL FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La topografía es un indicador que permite proponer que la dirección del flujo del agua subterránea se dirige de las partes topográficamente altas (áreas de recarga) hacia las topográficamente bajas (áreas de descarga); es decir, el flujo siempre ocurrirá de regiones con cargas hidráulicas mayores hacia regiones de cargas hidráulicas menores.

Regionalmente las direcciones de flujo del acuífero en el área de estudio se presentan en 04 direcciones y se detallan a continuación (Figura 7-1):

- Dirección de flujo hacia el NW que abarca la mayor parte del área de estudio siguiendo las quebradas Caimito, Uvero y Petaquilla. Esta dirección de flujo se encuentra dominada principalmente por la pendiente del terreno.
- Dirección de flujo en forma radial concéntrica que se encuentra influenciado por el Tajo Botija, y continuará con esta tendencia por el período de vida del Tajo Botija (ver Figura 7-1 a Figura 7-5).
- Dirección de flujo hacia el NE, esta dirección de flujo se encuentra influenciado por la topografía del terreno, la dirección de flujo se encuentra aproximadamente de manera transversal hacia el río Uvero.
- Dirección de flujo hacia el SW y NW, esta dirección de flujo se encuentra influenciado por la topografía del terreno, la dirección de flujo se encuentra aproximadamente de manera transversal hacia el río Uvero.

Localmente la dirección del flujo del acuífero se dirige desde los sectores altos (divisoria de aguas) hasta el cauce de las quebradas o ríos, siendo influenciados principalmente por la topografía.

En la Figura 7-1 se puede observar la dinámica del flujo del acuífero en el área de estudio y en las Figura 7-2 hasta la Figura 7-5 (Secciones Hidrogeológicas Interpretadas) se puede observar la dinámica de flujo del acuífero transversal y longitudinalmente en el área de estudio.

7.6 CONDICIONES DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

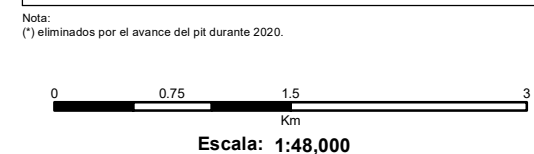
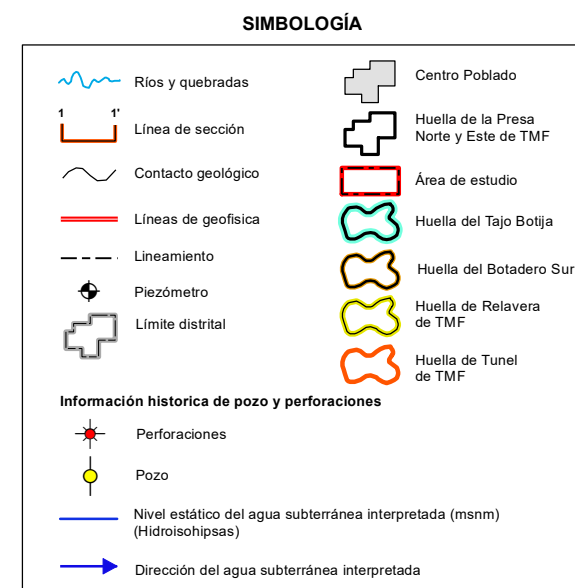
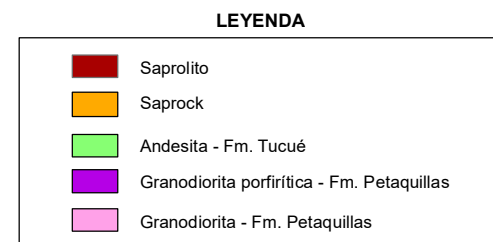
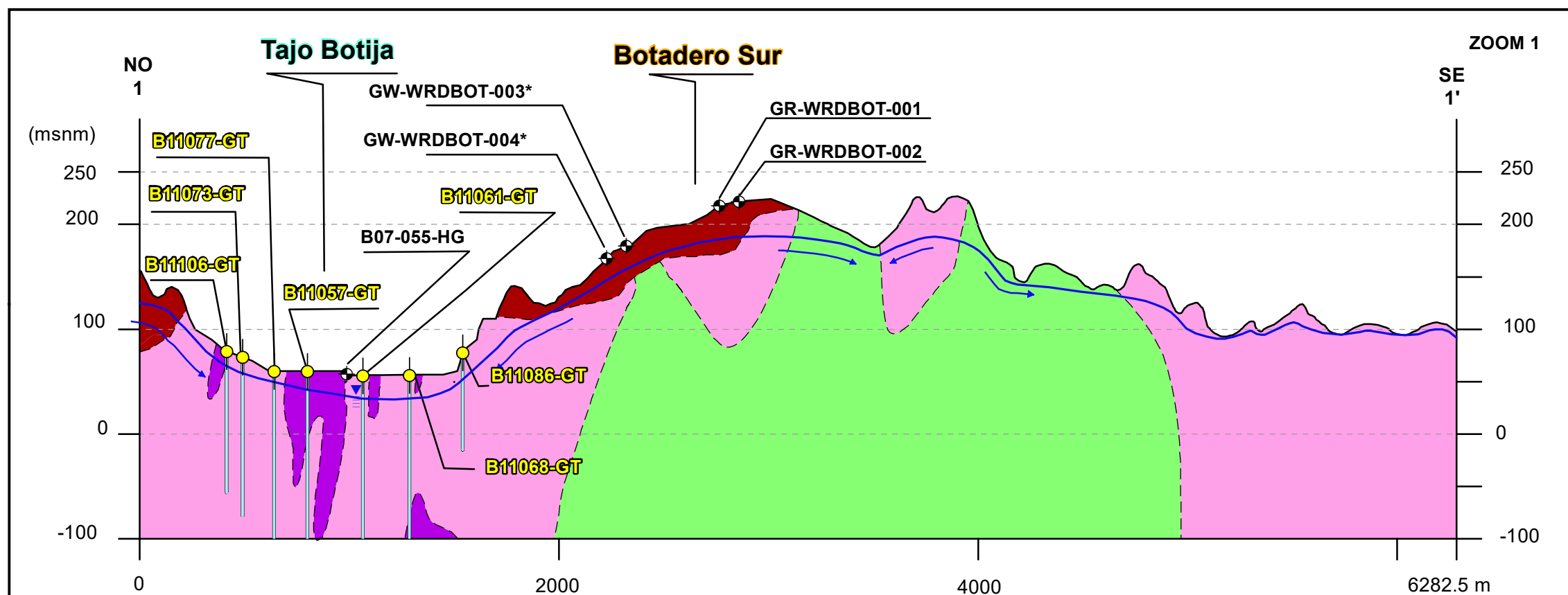
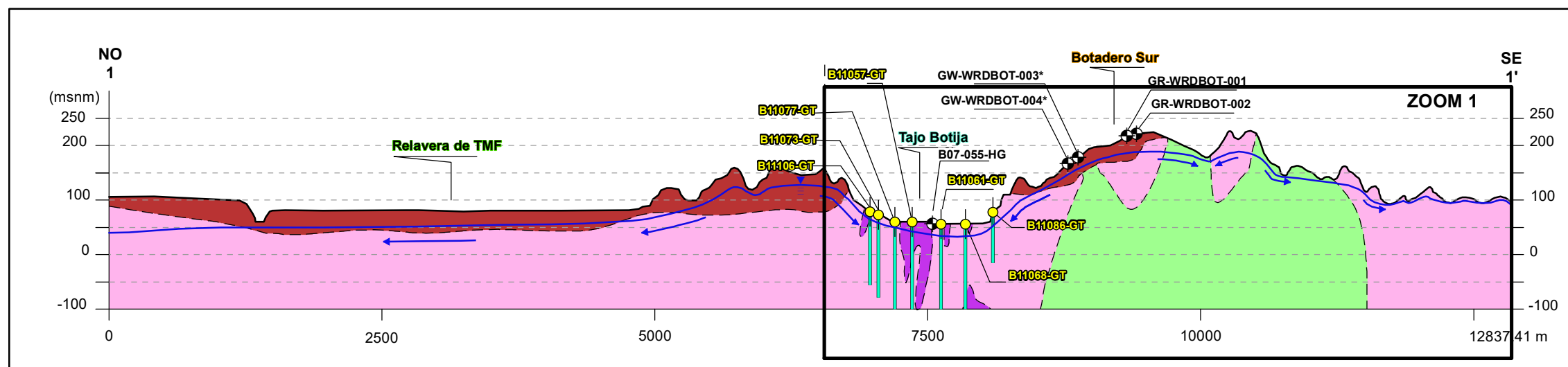
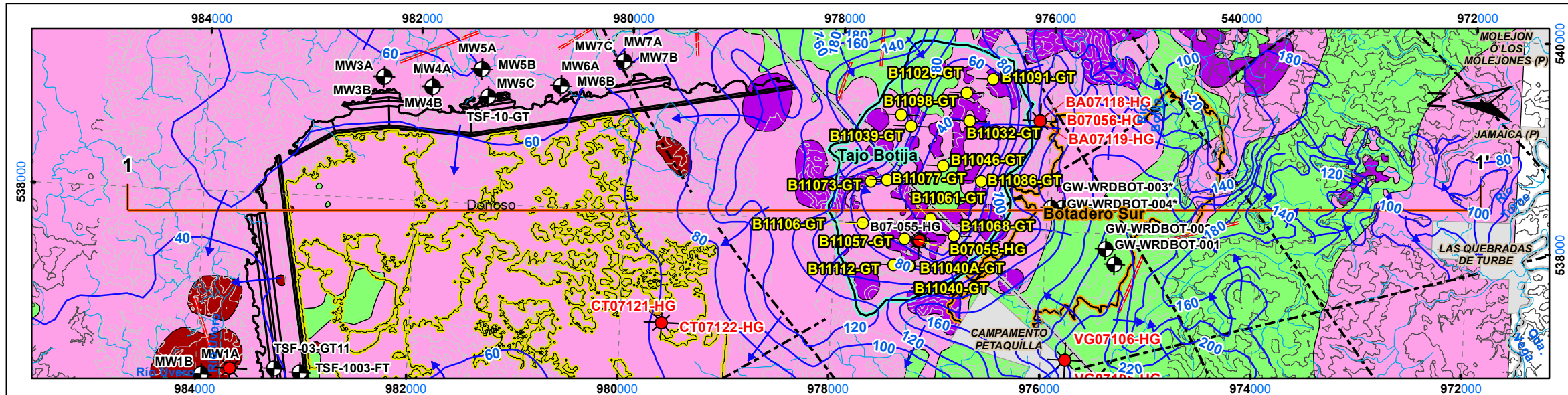
- Se ha identificado una (01) unidad hidrogeológica (UH-01), constituida por rocas altamente meteorizadas (saprolitos) y rocas frescas de la Formación Tucué constituida por lavas andesíticas-basálticas y la Formación Petaquilla constituida por rocas intrusivas granodioríticas, estas condiciones litológicas generan variabilidad de los valores de conductividad hidráulica, permitiendo generar dos (02) sub-unidades hidrogeológicas (UH-01A y UH-01B) asociadas a dicho comportamiento.
- En profundidad el modelo conceptual cuenta con dos estratos: UH-01 que se divide en dos subunidades; UH-01A que se encuentra conformado por rocas altamente

meteorizadas (saprolitos), con potencia media de 9.0 m y alcanza profundidades que llegan hasta los 14.0 m; y UH-01B, que se encuentra subyaciendo a la UH-01A, conformada por rocas frescas y ligeramente meteorizadas (saprock) de las formaciones Tucué y Petaquilla, con espesores y datos hasta los 398 m de profundidad; se presume que continúa a mayor profundidad y su conductividad hidráulica disminuye conforme profundiza.

- Las zonas de mayor recarga se encuentran en las partes altas de las cuencas del río Petaquilla, río Caimito y río Uvero, donde aflora litología intrusiva y volcánica ligeramente meteorizada y fracturada (saprock) y altamente meteorizadas (saprolitos), producto de sistemas estructurales que permiten tener una conectividad hidráulica de los materiales superiores con los situados en profundidad. De esta manera, se permite la alimentación al sistema de flujo subterráneo, el cual posteriormente es descargado en los fondos de las quebradas, valles y zonas llanas. El periodo de recarga, para un año promedio, se da principalmente entre los meses de mayo y diciembre (estación húmeda), en los demás meses del año se presentan eventos de recarga media, dado que parte de la precipitación se almacena en la zona no saturada del suelo y no llega a infiltrarse profundamente, manifestándose esto en la baja descarga en época de estiaje.
- La descarga de las aguas subterráneas del sistema hidrogeológico se produce por descarga natural, producto del flujo local de aguas subterráneas en las depresiones de los niveles inferiores, que actúan como drenaje. El mecanismo de descarga se produce principalmente en los fondos de las quebradas, valles y zonas llanas, realizando un aporte continuo al caudal base del drenaje principal (río Petaquilla, río Caimito, río Uvero y afluentes). Las zonas de descarga del agua subterránea en época de lluvias, dentro del área de estudio, se producen en los fondos de las quebradas, valles y zonas llanas; lo cual se manifiesta con el incremento de los niveles freáticos, así también en época de estiaje la descarga es relativamente baja, lo cual se manifiesta con la disminución de los niveles freáticos.
- Regionalmente las direcciones de flujo del acuífero en el área de estudio se presentan en 04 direcciones, la primera dirección de flujo hacia el NW que abarca la mayor parte del área de estudio siguiendo las quebradas Caimito, Uvero y Petaquilla. La segunda dirección de flujo en forma radial concéntrica que se encuentra influenciado por el Tajo Botija; la tercera dirección de flujo hacia el NE (dirección de flujo aproximadamente de manera transversal hacia el río Uvero) y la cuarta dirección de flujo hacia el SW y NW (dirección de flujo aproximadamente de manera transversal hacia el río Uvero).
- Localmente la dirección del flujo del acuífero se dirige desde los sectores altos (divisoria de aguas) hasta el cauce de las quebradas o ríos, siendo influenciados principalmente por la topografía.
- La fluctuación de la piezometría presenta respuestas diferentes, presentando dependencia en 1) los ingresos de agua en la zona saturada y 2) su proximidad a superficie. El mayor flujo de agua subterránea ocurre principalmente en la unidad hidrogeológica UH-01B, encontrándose el agua subterránea a profundidades de 1.0 – 18.0 m.

- El flujo de las aguas subterráneas en sectores con predominancia estructural ocurre a través de fracturas y fallas conductivas, dichos flujos pueden ser someros o profundos y con menor tiempo de tránsito, dependiendo de la condición de las fracturas conductivas por las que circulan. En el área de estudio se han identificado fallas y lineamientos, pero su influencia no es significativa en el análisis de las conductividades hidráulicas del acuífero, tal como se mostró en el diagrama conductividades hidráulicas vs profundidad (Figura 5-2, donde se observa que la influencia sobre el acuífero se da principalmente por la profundidad y no por un comportamiento estructural.
- Por las condiciones hidrogeológicas y topográficas actuales de la zona norte del depósito de relaves y de las poblaciones San Benito, Nueva Esperanza y Nuevo Sinaí con respecto al Tajo Botija y al depósito de Relaves. Resulta poco probable que exista un flujo de agua subterránea directamente hacia dichos lugares, en vista que entre ambos hay colinas, de pequeñas a medianas elevaciones, y quebradas (arroyos) que actúan como barreras naturales; sin embargo, podría existir la posibilidad de ocurrir este flujo a través de fallas regionales y subregionales, por lo que será necesario evaluar dichas estructuras con apoyo de estudios geofísicos más profundos y perforaciones.

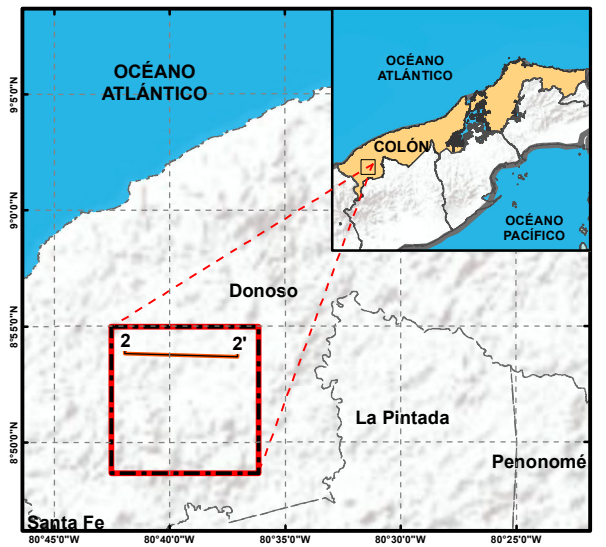
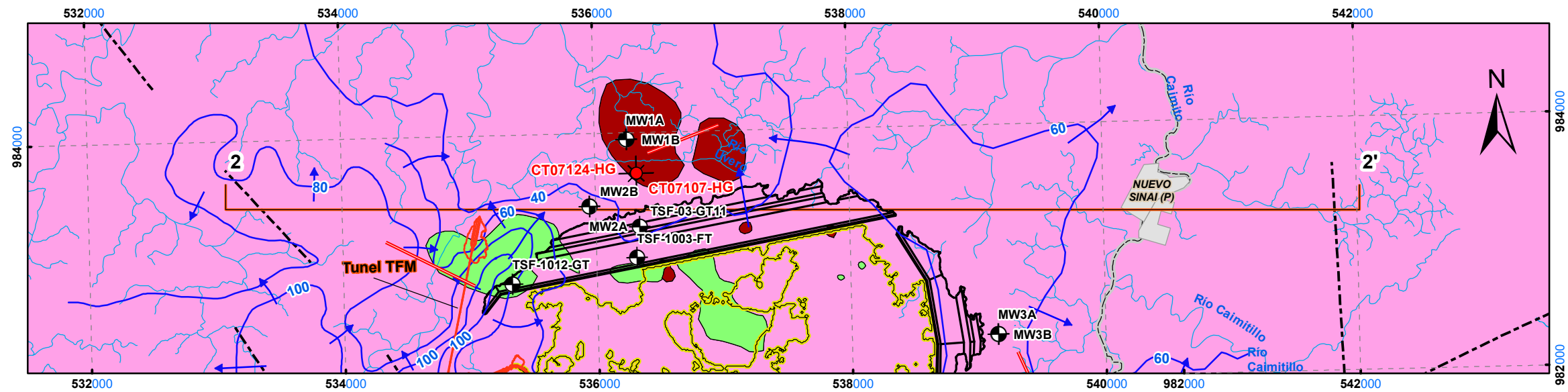
En la Figura 7-1 (Mapa Hidrogeológico Interpretado) y en las Figura 7-2 a Figura 7-5 (Secciones Hidrogeológicas Interpretadas), se muestra el modelo hidrogeológico conceptual esquemático del área de estudio.



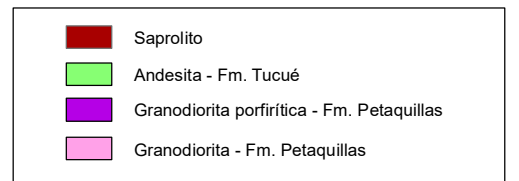
ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ

Sección Hidrogeológica 1-1' (setiembre 2020)

Global Yaku Consultores Innovación para un Mundo Mejor	PROYECCION:	UTM	FIGURA N°: 7 - 2			
	DATUM:	WGS 84				
	ZONA:	17 N				
ELABORADO:	DIBUJADO:	M.C.	REVISADO:	A.H.	FECHA:	octubre, 2021
FUENTE:		ARCHIVO:				
Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGNTG)		Figura 7-2_Sección Hidrogeológica 1-1' (setiembre 2020).mpk				



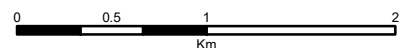
LEYENDA



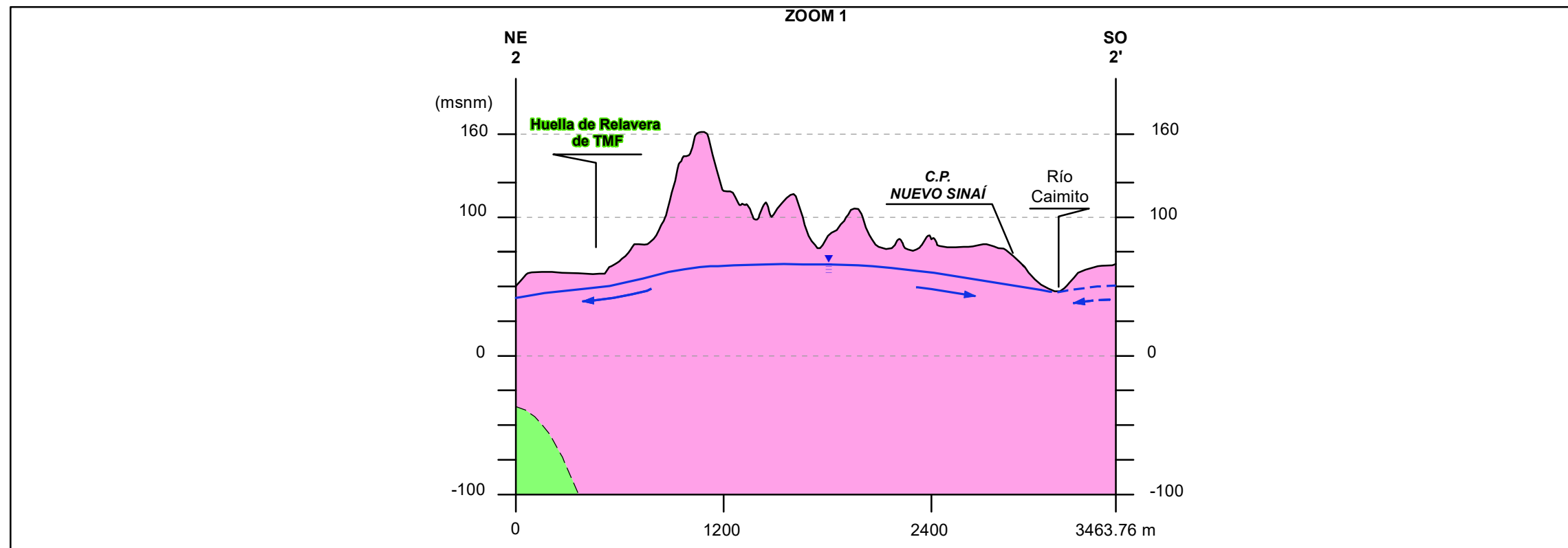
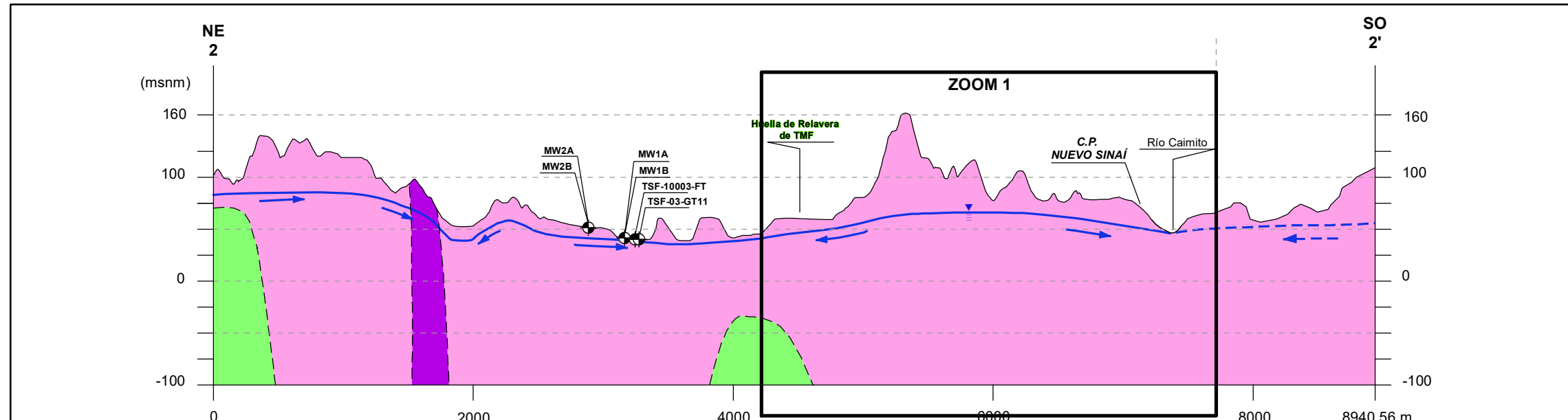
SIMBOLOGÍA



Nota:
(*) eliminados por el avance del pit durante 2020.



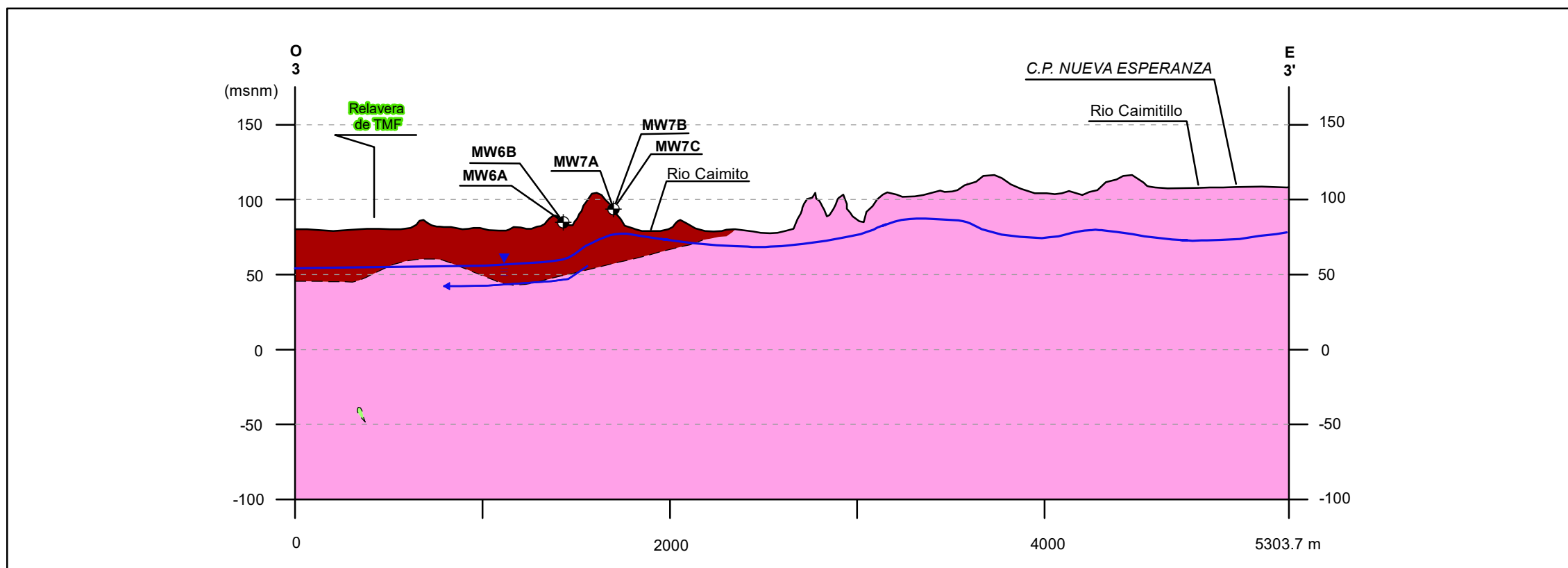
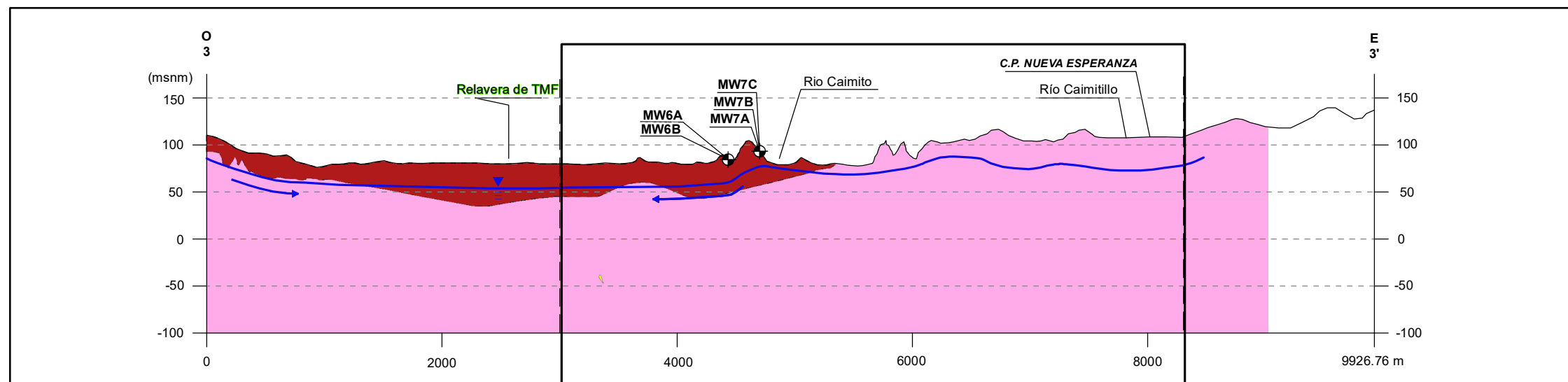
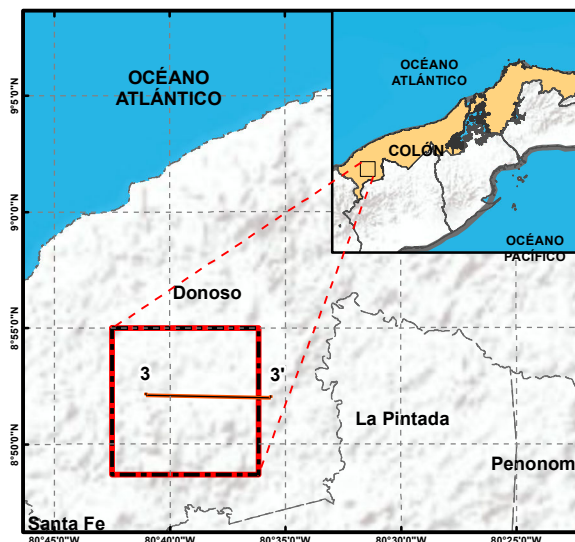
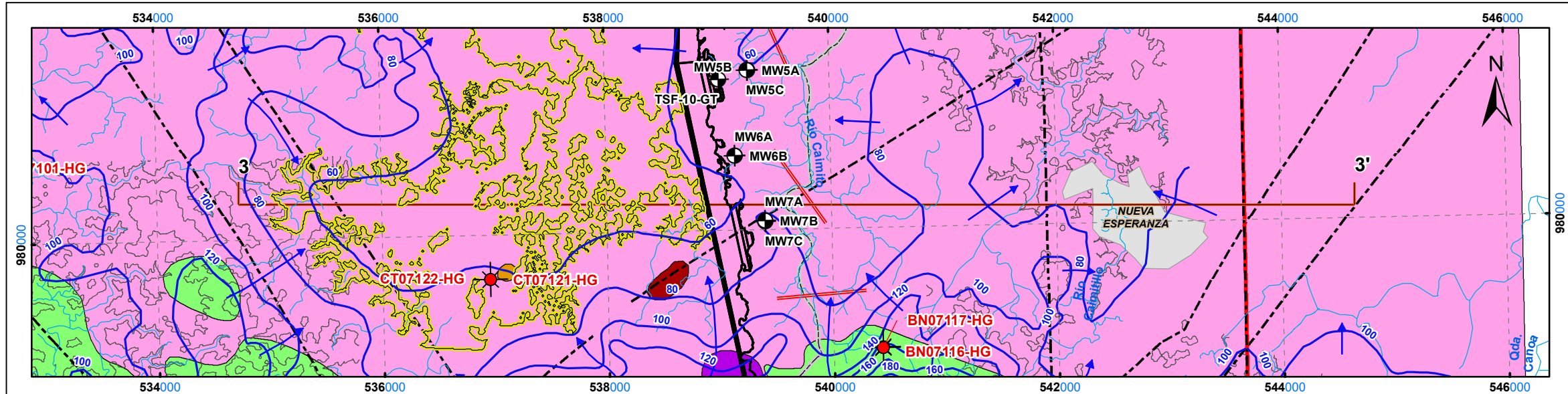
Escala: 1:40,000



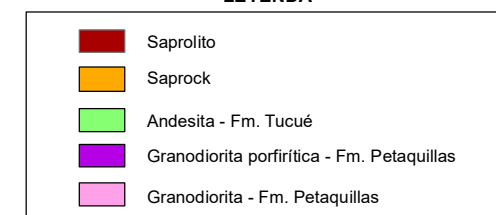
ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ

Sección Hidrogeológica 2-2' (setiembre 2020)

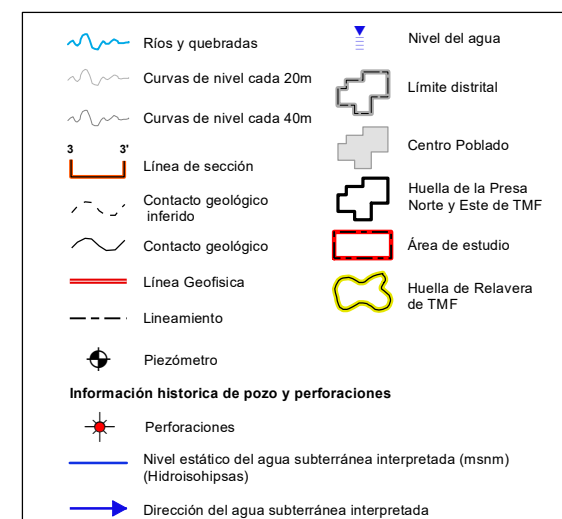
Global Yaku Consultores GYC Innovación para un Mundo Mejor	PROYECCION:	UTM	FIGURA N°: 7 - 3
	DATUM:	WGS 84	
	ZONA:	17 N	
ELABORADO:	DIBUJADO:	M.C.	REVISADO:
FUENTE:	ARCHIVO:		
Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGNTG)	Figura 7-3_SSección Hidrogeológica 2-2' (setiembre 2020).mpk		



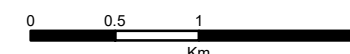
LEYENDA



SIMBOLOGÍA



Nota:
(*) eliminados por el avance del pit durante 2020.



Escala: 1:45,000

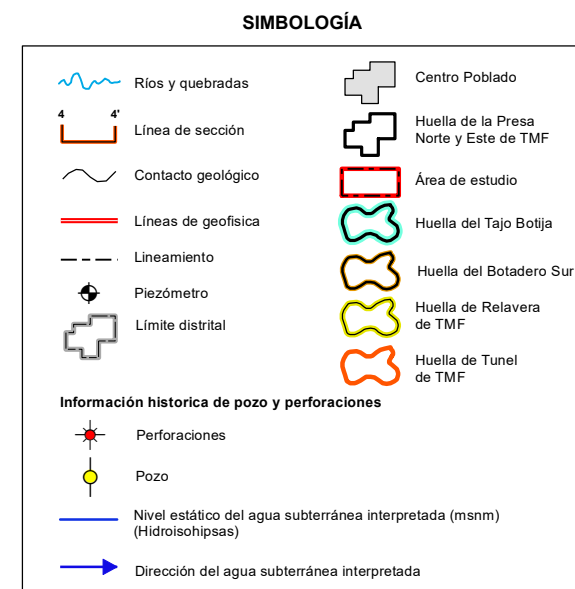
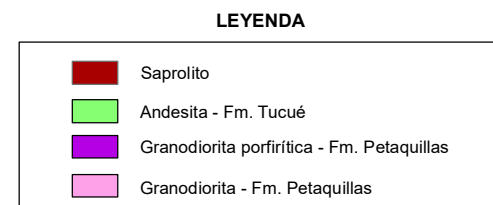
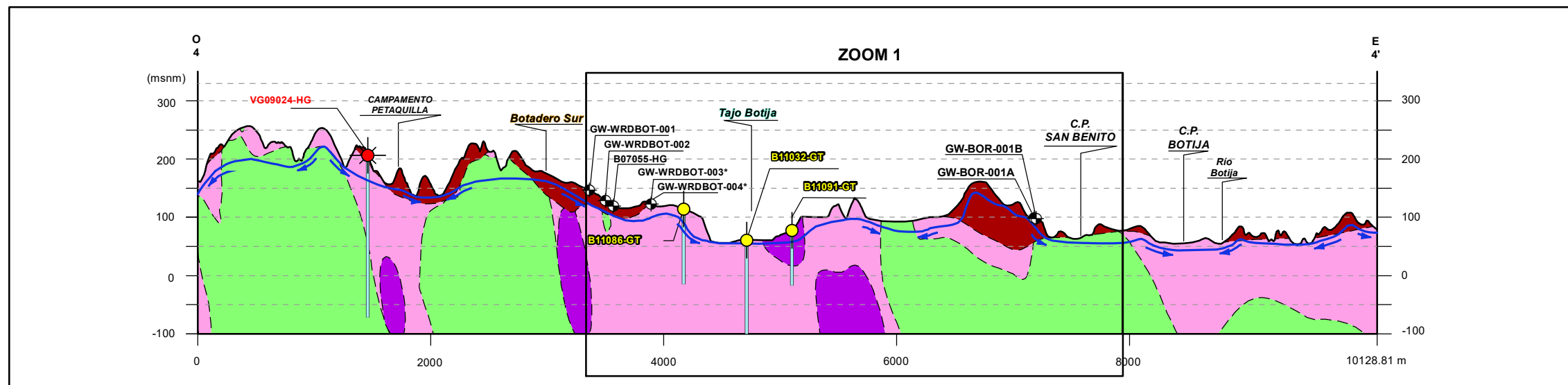
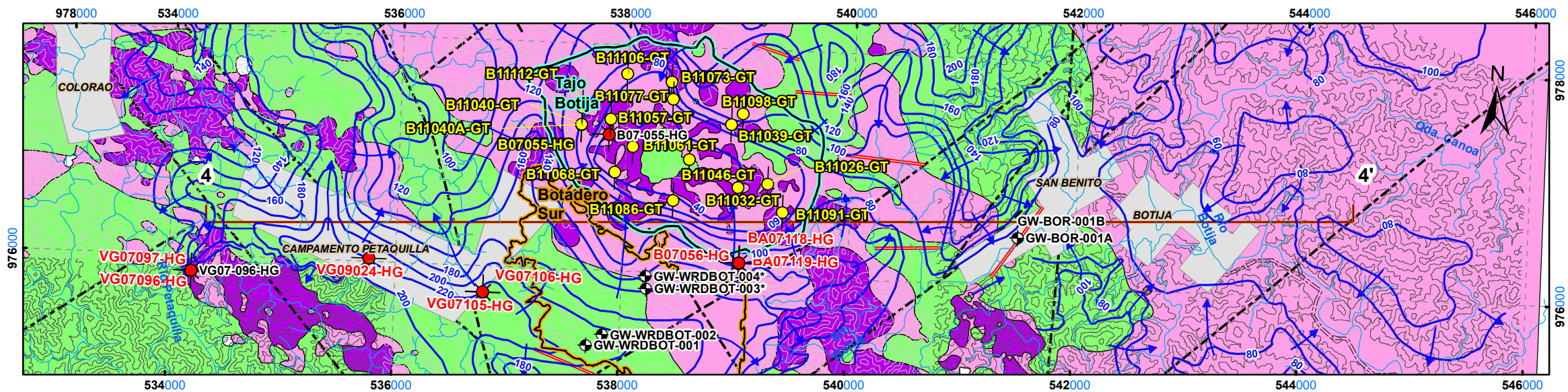


ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ

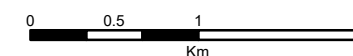
Sección Hidrogeológica 3-3' (setiembre 2020)

Global Yaku Consultores GYC Innovación para un Mundo Mejor	PROYECCION:	UTM	FIGURA N°: 5 - 4
	DATUM:	WGS 84	
	ZONA:	17 N	
ELABORADO:	DIBUJADO:	M.C.	REVISADO:
FUENTE:	ARCHIVO:		
Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGNTG)	Figura 5-4, Sección Hidrogeológica 3-3' (setiembre 2020).mpk		

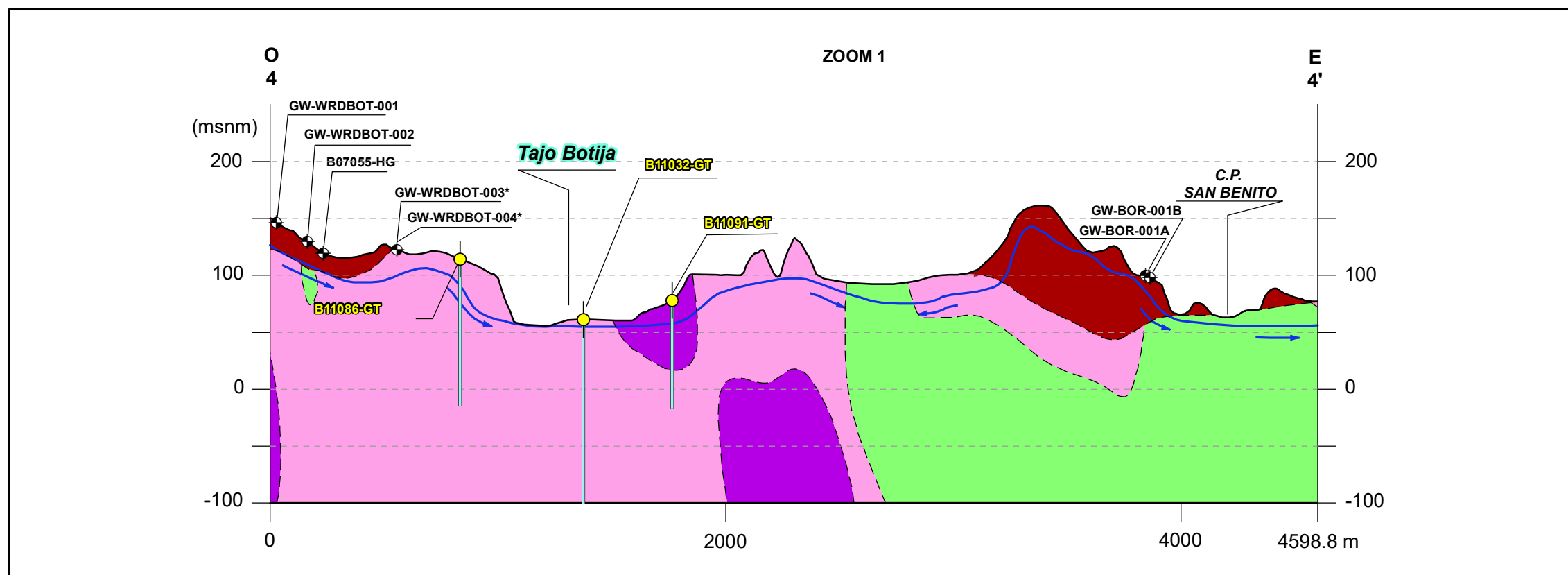
FECHA: octubre, 2021



Nota:
(*) eliminados por el avance del pit durante 2020.



Escala: 1:45,000



ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ			
Sección Hidrogeológica 4-4' (setiembre 2020)			
Global Yaku Consultores Innovación para un Mundo Mejor	PROYECCION:	UTM	FIGURA N°: 7 - 5
	DATUM:	WGS 84	
	ZONA:	17 N	
ELABORADO:	DIBUJADO:	M.C.	REVISADO: A.H.
FUENTE:	ARCHIVO:		
Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGNTG)		Figura 7-5, Sección Hidrogeológica 4-4' (setiembre 2020).mpk	
		FECHA: octubre, 2021	

8 CONCLUSIONES

- El área de estudio está conformada por rocas altamente meteorizadas (saprolitos) y rocas volcánicas frescas de la Formación Tucué, compuestas por lavas andesíticas-basálticas y la Formación Petaquilla compuestas por rocas intrusivas granodioríticas. Los saprolitos cubren las partes bajas del valle, cauces de ríos y quebradas.
- En base a la geofísica, las líneas tomográficas levantadas e interpretadas alrededor del Tajo Botija, indican que se tiene alrededor de la superficie del terreno ocurrencias de paleocauces representados por depósitos aluviales. La composición litológica granulométrica de estos depósitos es de fina a gruesa y permiten la conformación de acuíferos locales con mediana a alta porosidad.
- En base a la geofísica, la interpretación señala que el basamento rocoso (lecho rocoso) está conformado por rocas ígneas intrusivas y volcánicas, que en algunos sectores se mantiene fresca reflejando los valores altos de resistividad, pero siempre con aureolas de meteorización que pasan de saprock (roca ligeramente meteorizada) a espesas secuencias de saprolito (rocas altamente meteorizadas). La roca ígnea fresca con alto grado de fracturamiento, tipológicamente se comporta como un acuitardo con porosidad secundaria, pero con muy baja capacidad de almacenamiento de agua subterránea, debido a que las fracturas se encuentran rellenas con material fino. Así también el saprock y el saprolito por su granulometría fina y meteorización se comportan como acuitardo y acuífero permeable respectivamente.
- En el área de estudio se cuenta con información de 28 piezómetros (10 piezómetros simples, 6 piezómetros multinivel dobles y 2 piezómetros multinivel triples) ubicados cerca de la relavera: 07 al noroeste y 13 al este. Además de 01 en el Tajo Botija, 02 al este, 04 al sur y 01 al suroeste.
- Las fluctuaciones del nivel del agua subterránea recientes (febrero 2019 – mayo 2021) en los piezómetros del área de estudio (22 piezómetros) presentan la siguiente dinámica del agua subterránea: (1) Niveles medidos desde 1.0 hasta 3.0 m de profundidad, que presentan variaciones máximas de 1.0 m, (2) niveles medidos desde 4.5 m hasta 9.0 m de profundidad, que presentan variaciones máximas de 1.5 m y (3) niveles medidos desde 10.0 m hasta 17.0 m de profundidad, que presentan variaciones máximas de 8.0 m que obedecerían principalmente a la influencia de las labores mineras debido a la cercanía al tajo (labores de explotación y bombeo del tajo).
- Los resultados del análisis químico de agua en laboratorio en el periodo febrero y marzo de 2021, indican que las aguas en general presentan un pH neutro, con un valor promedio de 7.16, con ligeras variaciones entre aguas ligeramente ácidas a moderadamente básicas con valores comprendidos entre 6.4 (MW6A) y 8.15 (MW5B). La conductividad eléctrica en general fluctúa entre 45.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (MW2A) a 403.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (MW1B) que indica aguas dulces, y los contenidos de sulfato varían entre 1.31 mg/l (MW1B) hasta 77.34 mg/l (MW5B). Cabe indicar que la excepción a lo mencionado anteriormente con respecto al pH y CE se da en los piezómetros GW-BOR-001A y GW-BOR-001B, que presentan valores pH básico muy fuerte (11.76 y 11.31) y conductividades eléctricas moderadas (1866 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 830 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

- Los principales cationes dominantes, obtenidos del monitoreo en el periodo febrero y marzo de 2021, presentan 2 tendencias: $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ y $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$. El calcio presenta un promedio de 31.66 mg/l, con un mínimo de 0.72 mg/l hasta un máximo de 98.32 mg/l; de la misma forma, el sodio presenta un promedio de 20.31 mg/l, con un mínimo de 2.2 mg/l hasta un máximo de 59 mg/l, siendo estos dos (calcio y sodio), los cationes con mayor concentración en las muestras de agua.
- En base al análisis de los resultados químicos, considerando los cationes y aniones mayoritarios, se ha determinado 04 grupos de agua, siendo estos: Aguas de la familia clorurada cálcica, sulfatada cálcica, bicarbonatada sódica y bicarbonatada cálcica.
- Se ha identificado una (01) unidad hidrogeológica (UH-01) constituida por rocas altamente meteorizadas (saprolitos) y rocas frescas de la Formación Tucué constituida por lavas andesíticas-basálticas y la Formación Petaquilla constituida por rocas intrusivas granodioríticas, estas condiciones litológicas generan variabilidad de los valores de conductividad hidráulica, permitiendo generar 02 sub-unidades hidrogeológicas (UH-01A y UH-01B) asociadas a dicho comportamiento.
- En profundidad el modelo conceptual cuenta con dos estratos: UH-01 que se divide en dos sub-unidades; UH-01A que se encuentra conformado por rocas altamente meteorizadas (saprolitos), con potencia media de 9.0 m y alcanza profundidades que llegan hasta los 14.0 m; y UH-01B. Subyacen UH-01A, conformada por rocas frescas y ligeramente meteorizadas (saprock) de las formaciones Tucué y Petaquilla, con espesores y datos hasta los 398 m de profundidad; se presume que continúa a mayor profundidad y su conductividad hidráulica disminuye conforme profundiza.
- Las zonas de mayor recarga se encuentran en las partes altas de las cuencas del río Petaquilla, río Caimito y río Uvero, donde aflora litología intrusiva y volcánica ligeramente meteorizada y fracturada (saprock), producto de sistemas estructurales que permiten tener una conectividad hidráulica de los materiales superiores con los situados en profundidad. De esta manera se permite la alimentación al sistema de flujo subterráneo, el cual posteriormente es descargado en los fondos de las quebradas, valles y zonas llanas. El periodo de recarga, para un año promedio, se da principalmente entre los meses de mayo y diciembre (estación húmeda), en los demás meses del año se presentan eventos de recarga media, dado que parte de la precipitación se almacena en la zona no saturada del suelo y no llega a infiltrarse profundamente, manifestándose esto en la baja descarga en época de estiaje.
- La descarga de las aguas subterráneas del sistema hidrogeológico se produce por descarga natural, producto del flujo local de aguas subterráneas en las depresiones de los niveles inferiores, que actúan como drenaje. El mecanismo de descarga se produce principalmente en los fondos de las quebradas, valles y zonas llanas, realizando un aporte continuo al caudal base del drenaje principal (río Petaquilla, río Caimito, río Uvero y afluentes). Las zonas de descarga del agua subterránea en época de lluvias dentro del área de estudio se producen en los fondos de las quebradas, valles y zonas llanas, lo cual se manifiesta con el incremento de los niveles freáticos, así también en época de estiaje la descarga es relativamente baja, lo cual se manifiesta con la disminución de los niveles freáticos.

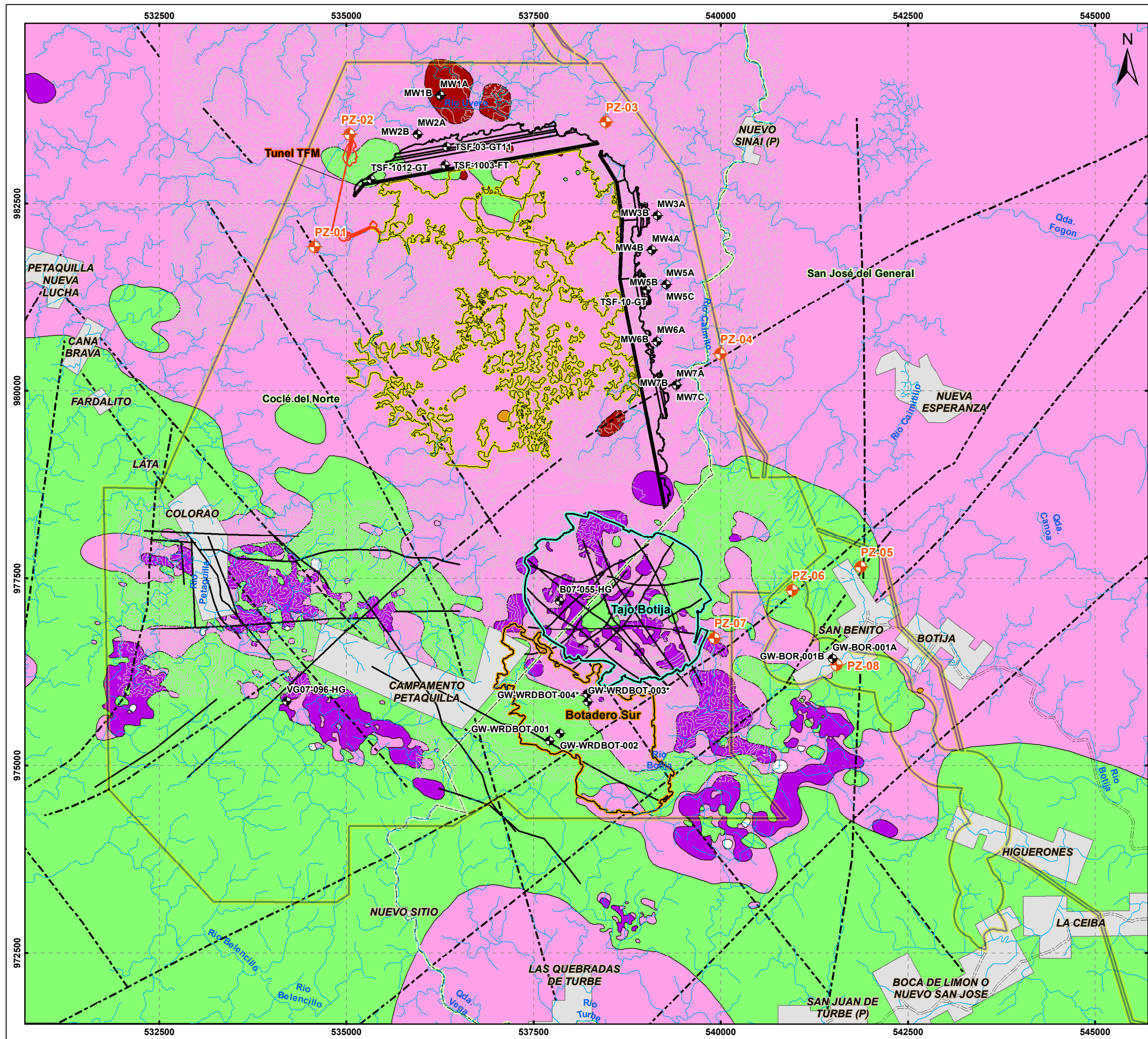
- Regionalmente las direcciones de flujo del acuífero en el área de estudio se presentan en 04 direcciones: la primera dirección de flujo es hacia el NW, abarca la mayor parte del área de estudio siguiendo las quebradas Caimito, Uvero y Petaquilla. La segunda dirección de flujo es en forma radial concéntrica y se encuentra influenciado por el Tajo Botija. La tercera dirección de flujo es hacia el NE (dirección de flujo aproximadamente de manera transversal hacia el río Uvero) y la cuarta dirección de flujo es hacia el SW y NW (dirección de flujo aproximadamente de manera transversal hacia el río Uvero).
- Localmente la dirección del flujo del acuífero se dirige desde los sectores altos (divisoria de aguas) hasta el cauce de las quebradas o ríos, siendo influenciados principalmente por la topografía.
- La fluctuación de la piezometría presenta respuestas diferentes, siendo que su variación depende de 1) los ingresos de agua en la zona saturada y 2) su proximidad a superficie. El mayor flujo de agua subterránea ocurre principalmente en la unidad hidrogeológica UH-01B, encontrándose el agua subterránea a profundidades de 1.0 – 18.0 m.
- El flujo de las aguas subterráneas en sectores con predominancia estructural ocurre a través de fracturas y fallas conductivas, dichos flujos pueden ser someros o profundos y con menor tiempo de tránsito, dependiendo de la condición de las fracturas conductivas por las que circulan. En el área de estudio se han identificado fallas y lineamientos, pero de acuerdo con los datos revisados, su influencia no es significativa en el análisis de las conductividades hidráulicas del acuífero, lo cual se demuestra en el análisis de conductividades hidráulicas vs profundidad, donde se observa que la influencia sobre el acuífero se da principalmente por la profundidad mas no por un comportamiento estructural.
- En base al análisis de niveles freáticos medidos en los piezómetros y niveles freáticos interpretados en el área de estudio, se puede mencionar que los niveles freáticos en el tajo se encuentran entre 5.0 a 10.0 m de profundidad aproximadamente. En el depósito de relaves se encuentran entre 10.0 a 20.0 m de profundidad aproximadamente, en el CP Nuevo Sinaí y CP Nueva Esperanza se encuentra a 10.0 m de profundidad aproximadamente y en el CP San Benito se encuentra a 3.0 m de profundidad aproximadamente.
- Por las condiciones hidrogeológicas y topográficas actuales de la zona norte del depósito de relaves y de los CP San Benito, Nueva Esperanza y Nuevo Sinaí con respecto al Tajo Botija y al depósito de Relaves. Es poco probable que exista un flujo de agua subterránea directamente hacia dichos lugares, en vista que entre ambos hay colinas, de pequeñas a medianas elevaciones, y quebradas (arroyos) que actúan como barreras naturales; sin embargo, podría existir la posibilidad de ocurrir este flujo a través de fallas regionales y subregionales, por lo que será necesario evaluar dichas estructuras con apoyo de estudios geofísicos más profundos y perforaciones.

9 RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio geológico estructural más detallado de las fallas y lineamientos en las cercanías del Tajo Botija y de los CP San Benito, Nueva Esperanza y Nuevo Sinaí, para identificar su cinemática y clasificar el tipo de falla, que permitirá tener un mejor control para la profundización en el tajo y definir las potenciales conexiones del Tajo Botija con dichos centros poblados.
- Identificadas las potenciales fallas, realizar estudios geofísicos más profundos (hasta profundidades de 200 a 250 m), con el método de tomografía eléctrica, de preferencia en las cercanías de los CP San Benito, Nueva Esperanza y Nuevo Sinaí. Con la finalidad de definir las condiciones y extensiones de las potenciales fallas geológicas regionales que puedan conectar las infraestructuras mineras con dichos centros poblados. La geofísica realizada a la fecha es somera (menores a 130 m de profundidad) y limitada a los alrededores del Tajo Botija.
- Considerar la instalación de 8 piezómetros adicionales de acuerdo con las coordenadas señaladas en la Tabla 9.1 y según el detalle de la Figura 9-1. La finalidad es monitorear las fluctuaciones del nivel piezométrico del agua subterránea con mayor precisión, mediante la toma de niveles piezométricos y, adicionalmente, toma de muestras de agua para su análisis químico en laboratorio y determinar la calidad de agua.
- Continuar con los monitoreos de los niveles piezométricos existentes en el área de estudio, de preferencia con apoyo de equipos automatizados (datalogger o transducer), así como de los arroyos o ríos (aforos y análisis hidroquímicos).

Tabla 9-1 Coordenadas de piezómetros propuestos

Piezómetro propuesto	Coordenadas UTM (WGS84 – Zona N17)	
	Este (m)	Norte (m)
PZ-01	534575	981921
PZ-02	535042	983421
PZ-03	538468	983585
PZ-04	539995	980492
PZ-05	541872	977650
PZ-06	540956	977341
PZ-07	539913	976703
PZ-08	541548	976342



LEYENDA

- Saprolito
- Saprock
- Andesita - Fm. Tucué
- Granodiorita porfirítica - Fm. Petaquillas
- Granodiorita - Fm. Petaquillas

SIMBOLOGÍA

- Curvas de nivel
- Lineamiento
- Rios y quebradas
- Huella del Proyecto
- Límite distrital
- Centro Poblado
- Huella de la Presa Norte y Este de TFM
- Área de estudio
- Huella del Tajo Botija
- Huella del Botadero Sur
- Huella de Relavera de TFM
- Huella de Tunnel de TFM
- Piezómetros Activos
- Piezómetros Propuestos GYC

0 0.5 1 2
Km
Escala: 1:50,000



ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE MINA COBRE PANAMÁ

Ubicación de los Piezómetros Propuestos

Global Yaku Consultores GYC Innovación para un Mundo Mejor	PROYECCION:	UTM	FIGURA N°: 9 - 1
	DATUM:	WGS 84	
	ZONA:	17 N	
ELABORADO: E.L.	DIBUJADO: E.O./A.T.	REVISADO: A.H.	FECHA: octubre, 2021
FUENTE: Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGNTG), MINERA PANAMÁ S.A.		ARCHIVO: Figura 9-1_Ubicación de los Piezómetros Propuestos.mpk	

Anexos

Anexo I

TABLA DE ANALISIS HIDROQUÍMICO

[illegible]